

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ К ЗАДАЧАМ АЭРОДИНАМИКИ ВЕНТИЛЯЦИИ*

**О.А. АВЕРКОВА
А.Н. ЗАКУТСКИЙ
В.Ю. ЗОРЯ
К.И. ЛОГАЧЕВ
И.В. МИХАЙЛОВ
Л.А. МИХАЙЛОВА**

*Белгородский государственный
технологический университет
им.В.Г. Шухова
e-mail: kilogachev@intbel.ru*

Изложены алгоритмы численной реализации метода сингулярных интегральных уравнений (граничных интегральных уравнений и дискретных вихрей) для течений идеальной несжимаемой жидкости в многосвязных областях с вращающимися цилиндрами. Обсуждаются результаты решения задач пыле- и аэродинамики вентиляции, полученные с помощью разработанных компьютерных программ, которые могут использоваться для снижения экономических затрат на создание и эксплуатацию систем аспирации.

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

Величина производительности местных отсосов пропорциональна затратам электроэнергии, необходимых для их обслуживания. Поэтому производительность МВО должна с одной стороны обеспечивать улавливание загрязняющих веществ, с другой затраты электроэнергии должны быть минимальны.

Для расчетов местных отсосов использовались следующие методы: стоков, наложения потоков, функций комплексного переменного, вихревой или магнитной аналогии, электрогидродинамической аналогии, непосредственное решение уравнения Лапласа, особенностей, граничных интегральных уравнений, численное решение уравнения Навье-Стокса в различных упрощениях, дискретных вихрей.

Метод сингулярных интегральных уравнений включает в себя метод граничных интегральных уравнений (ГИУ) и метод дискретных вихрей (МДВ).

Метод ГИУ называют также непрямым методом граничных элементов (НМГЭ), обобщенным методом наложения потоков, методом «особенностей».

Зарубежные ученые Бенерджи П., Баттерфилд Р., Круз Т., Риццо Ф., Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Бреббия К., Уокер С. Wu, J.C., Wahbah, M.M. применяли метод ГИУ для решения задач аэродинамики и теории упругости. Вывод расчетных соотношений основывался на математическом подходе, а именно сведению дифференциальных уравнений к интегральным. Применяемый математический аппарат основывался на трудах русского математика Михлина С.Г.

Физический подход к построению расчетных соотношений продемонстрирован в работах Н.Я.Фабриканта.

Впервые метод ГИУ для расчета течений вблизи всасывающих отверстий применил Лившиц Г.Д. [1-3] и его ученики. В своей недавней статье [3] Лившиц Г.Д. отметил, что метод ГИУ для расчета всасывающих факелов к сожалению забыт.

Однако, как демонстрируют работы [4-11] метод ГИУ не только не забыт, но и получил дальнейшее существенное развитие. Разработанные алгоритмы и программы позволяют описать качественно и количественно течения пылевоздушных течений в многосвязных двумерных и трехмерных областях с границами произвольной конфигурации, которые могут содержать вращающиеся цилиндры и цилиндры отсосы.

Целью данной статьи является изложение основных результатов, полученных с использованием методов ГИУ и МДВ.

* Работа выполнена при грантовой поддержке РФФИ (проект № 08-08-13687-офи_ц) и РГНФ (проект № 08-06-55601а/Ц)



Основные расчетные соотношения и результаты, полученные по ним

Рассмотрим область течения с границей S , в каждой точке которой известна скорость вдоль вектора внешней нормали. В области находятся M вращающихся цилиндров и цилиндров-отсосов с линейными скоростями вращения $v_k, k=1, 2, \dots, M$. Расположим по границе S непрерывным образом источники (стоки) с интенсивностью $q(\xi, t)$. Непрерывная функция $q(\xi, t)$ зависит от координат граничной точки ξ и времени t . Зависимость от времени обусловлена тем, что при вращении цилиндров-отсосов, их всасывающие щели меняют свои положения во времени, поэтому изменяется форма границы с его течением. Для того чтобы учесть влияние вращения цилиндров на воздушный поток поместим в их центрах вихри с циркуляциями $\Gamma_k = 2\pi R_k v_k$, где R_k – радиус k -го цилиндра. Скорость во внутренней точке x вдоль заданного направления \vec{n} , вызываемая действием источников (стоков) и вихрей в момент времени t определяется из уравнения:

$$v_n(x, t) = \int_S F_2(x, \xi^k, t) q(\xi^k, t) dS(\xi^k) + 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x, c_k), \quad (1)$$

где c_k – точка центра k -го цилиндра.

Устремляя внутреннюю точку x к граничной x_0 вдоль единичного вектора внешней нормали в формуле (1) получим следующее граничное интегральное уравнение:

$$v_n(x_0, t) = -0,5q(x_0, t) + \int_S F_2(x_0, \xi^k, t) q(\xi^k, t) dS(\xi^k) + 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x_0, c_k), \quad (2)$$

где функция

$$F_2(x, \xi) = \frac{1}{2\pi} \frac{(x_1 - \xi_1)n_1 + (x_2 - \xi_2)n_2}{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2}. \quad (3)$$

выражает собой влияние на точку $x(x_1, x_2)$ единичного источника, расположенного в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$ вдоль единичного вектора $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$, а функция

$$G(x, \xi) = \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{2\pi \left((x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 \right)} \quad (4)$$

соответственно влияние единичного вихря.

Интеграл в формуле (2) не содержит особенность $x_0 = \xi$, что учитывается в первом слагаемом.

Разобьем границу области на N прямолинейных отрезков, на которых интенсивность источников (стоков) будет постоянной. Тогда дискретный аналог уравнения (2) следующий:

$$-0,5q(x_0^p, t) + \sum_{k=1}^N q(\xi^k, t) \int_{\Delta S^k} F_2(x_0^p, \xi^k, t) dS(\xi^k) = v_n(x_0^p, t) - 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x_0^p, c_k), \quad (5)$$

где x_0^p – середина p -го граничного отрезка;

Изменяя p от 1 до N в выражении (5) получим систему N линейных алгебраических уравнений с N неизвестными интенсивностями источников (стоков) в момент времени t . Скорость во внутренней точке x вдоль заданного направления в этот момент времени может быть вычислена из следующего выражения:

$$v_n(x, t) = \sum_{k=1}^N q(\xi^k, t) \int_{\Delta S^k} F_2(x, \xi^k, t) dS(\xi^k) + 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x, c_k). \quad (6)$$

Для трехмерного случая алгоритм реализации метода ГИУ строится аналогичным образом. Система уравнений для определения неизвестных источников (стоков) определится из системы уравнений:



$$\frac{1}{2}q(x_0^p) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^N q(\xi^k) \iint_{\Delta S^k} F_3(x_0^p, \xi^k) dS(\xi^k) = v_n(x_0^p), \quad p = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

x_0^p - центр тяжести p -го граничного элемента; ξ^k - произвольная точка k -го граничного элемента ΔS^k , по которым вычисляются поверхностные интегралы 1-го рода;

$$F_3(x, \xi) = \frac{1}{4\pi} \frac{(x_1 - \xi_1)n_1 + (x_2 - \xi_2)n_2 + (x_3 - \xi_3)n_3}{((x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2)^{3/2}}. \quad (8)$$

В системе (7) интенсивность $q(\xi^k)$ постоянная по всему граничному элементу. Обычно в качестве граничных элементов используются плоские треугольники.

Скорость внутри области определяется из выражения:

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N q(\xi^k) \iint_{\Delta S^k} F_3(x, \xi^k) dS(\xi^k). \quad (9)$$

Трехмерное течение, в области которого содержится вращающийся со скоростью $v_{вп}$ цилиндр радиуса R , находящегося в спектре действия вытяжного отверстия прямоугольной формы, встроенного в плоскую безграничную стенку, описано в работе [4].

Для учета вращения цилиндра по его оси помещали бесконечно длинный вихревой шнур с циркуляцией $\Gamma = v_{вп} \cdot 2\pi R$.

Система уравнений для определения неизвестных интенсивностей источников (стоков) имела вид:

$$v_n(x_0^p) = \frac{1}{2}q(x_0^p) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^N q(\xi^k) \iint_{\Delta S^k} F_3(x_0^p, \xi^k) dS(\xi^k) + 2\pi R v_{вп} G_n(x_0^p, r), \quad (10)$$

$$G_n(x, r) = \frac{1}{2\pi r} (\tau_1 n_1 + \tau_2 n_2 + \tau_3 n_3),$$

$$\vec{\tau} = \left\{ \frac{lr_3 - mr_2}{|\vec{a} \times \vec{r}|}, \frac{m_1 - mr_3}{|\vec{a} \times \vec{r}|}, \frac{mr_2 - lr_1}{|\vec{a} \times \vec{r}|} \right\},$$

$$r = \sqrt{(x_1 - mt - x_0)^2 + (x_2 - lt - y_0)^2 + (x_3 - nt - z_0)^2},$$

$$t = \frac{(x_1 - x_0)m + (x_2 - y_0)l + (x_3 - z_0)n}{m^2 + n^2 + l^2},$$

$$\vec{r} = \{r_1, r_2, r_3\} = \{x_1 - mt - x_0, x_2 - lt - y_0, x_3 - nt - z_0\}$$

$\vec{a} = \{m, l, n\}$ - направляющий вектор прямой; (x_0, y_0, z_0) - заданная на прямой точка.

Скорость воздуха в точке $x(x_1, x_2, x_3)$ вдоль направления $\vec{n} = \{n_1, n_2, n_3\}$ определялась из выражения:

$$v_n(x) = \iint_S F_3(x, \xi) q(\xi) dS(\xi) + 2\pi R v_{вп} G_n(x, r). \quad (11)$$

В случае если по границе располагают источники (стоки), то говорят, что используется простой слой. Если по границе расположить диполи, то будем иметь двойной слой; если вихри - вихревой слой.

В работе [4] показано, что если на тонком козырьке расположить источники (стоки) на обеих его стенках и устремить его толщину к нулю, то будет получен разрез области, по которому расположены диполи, т.е. получаем двойной слой. Было построено поле скоростей и линии тока в закрытой аспирируемой камере с козырьком в отделении растаривания порошков цеха периклазоуглеродистых изделий Семилукского огнеупорного завода. При моделировании использовалась следующая система уравнений для определения неизвестных источников (стоков) и моментов диполей:

$$-0,5q(x_0) + cm(x_0) + \int_S q(\xi) F_2(x_0, \xi) dS(\xi) + \int_L m(\xi) D(x_0, \xi) dL(\xi) = v_n(x_0), \quad (12)$$

где $c = \frac{n_1}{2\pi} \cos \alpha (1/b_2 - 1/a_2)$, α - угол наклона оси диполя к положительному направлению оси абсцисс локальной системы координат, построенной на отрезке, у которого наблюдается особенность $\xi = x_0$, b_2, a_2 - ординаты вершин этого отрезка, n_1 - горизонтальная составляющая нормали к данному отрезку, L - кривая разреза;

$$D(x, \xi) = \frac{[r_1^2 - r_2^2](n_1 \cos \alpha - n_2 \sin \alpha) + 2r_1 r_2 (n_1 \sin \alpha + n_2 \cos \alpha)}{2\pi [r_1^2 + r_2^2]^2}, \quad (13)$$

$m(\xi)$ - момент диполя, $\xi_1 = (\xi_1' + \xi_1'')/2$, $\xi_2 = (\xi_2' + \xi_2'')/2$, $r_1 = x_1 - \xi_1$, $r_2 = x_2 - \xi_2$, α - угол между осью диполя и положительным направлением оси OX .

Величина скорости в заданной точке определялась из формулы:

$$v_n(x) = \int_S q(\xi) F_2(x, \xi) ds(\xi) + \int_L m(\xi) D(x, \xi) dL(\xi). \quad (14)$$

Вихревой слой как указано в [4] можно использовать для моделирования течений с учетом пограничного слоя. Вблизи стенок сказывается влияние вихрей, что приводит к вращению жидкости вблизи них. Таким образом, вихревой слой кинематически эквивалентен пограничному слою. Вихревой слой был использован для моделирования течения у щелевого отсоса, в спектре действия которого находится цилиндр (рис.1).

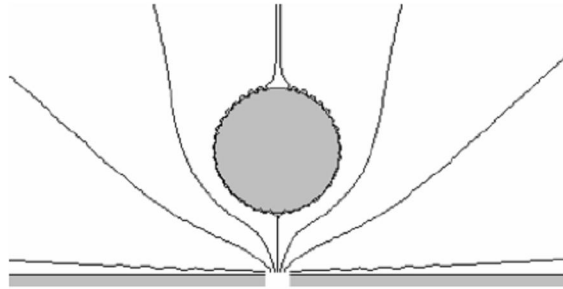


Рис. 1. Линии тока при обтекании цилиндра, находящегося в спектре действия щелевого отсоса, встроенного в плоскую стенку

Для определения неизвестных циркуляций вихрей использовалась следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N \Gamma(\xi^k) \int_{\Delta S^k} G(x_0^p, \xi^k) dS(\xi^k) + \Lambda = v_n(x_0^p), & p = 1, 2, \dots, N, \\ \sum_{k=1}^N l_k \Gamma(\xi^k) = 0, \end{cases} \quad (15)$$

где Λ - регуляризирующая переменная, предложенная профессором Лифановым И.К. [12], l_k - длина k -го отрезка.

Скорость находилась из выражения:

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N \Gamma(\xi^k) \int_{\Delta S^k} G(x, \xi^k) dS(\xi^k).$$

Траектория пылевой частицы строилась на основании интегрирования уравнения ее движения:

$$\frac{1}{6} \rho_v \pi d_e^3 v_v'(t) = -\psi |\vec{v}_v - \vec{v}_e| (\vec{v}_v - \vec{v}_e) \rho_e \chi S_m / 2 + \frac{1}{6} \rho_v \pi d_e^3 \vec{g}, \quad (16)$$



где ρ_p, ρ_e – плотности пылевой частицы и воздуха соответственно; \vec{v}_p – вектор скорости пылевой частицы; \vec{v}_e – скорость воздуха; $d_e, S_m = \pi d_e^2/4$ – эквивалентный диаметр и площадь миделевого сечения пылевой частицы соответственно; χ – коэффициент динамической формы частицы; \vec{g} – ускорение свободного падения; ψ – коэффициент сопротивления среды, вычисляемый по формуле

$$\psi = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}}, & \text{если } \text{Re} < 1, \\ \frac{24(1 + \sqrt[3]{\text{Re}^2}/6)}{\text{Re}}, & \text{если } 1 \leq \text{Re} \leq 1000, \\ \frac{24\sqrt{(1 + 0,065\sqrt[3]{\text{Re}^2}/6)^3}}{\text{Re}}, & \text{если } \text{Re} > 1000, \end{cases} \quad (17)$$

где $\text{Re} = \frac{\rho_e |\vec{v}_p - \vec{v}_e| d_e}{\mu}$, μ – коэффициент динамической вязкости воздуха.

Пылевая частица, движущаяся со скоростью $\vec{v} = \{v_{1r}, v_{1n}\}$ (проекция скорости на касательную и нормаль к границе), сталкиваясь со стенкой, приобретает тангенциальную v_{2r} и нормальную v_{2n} составляющие скорости, вычисляемые по формуле:

$$v_{2n} = -kv_{1n}, \quad v_{2r} = v_{1r} + \eta f(1+k)v_{1n}, \quad (18)$$

где k – коэффициент восстановления при ударе; f – коэффициент трения скольжения; $\eta = -\frac{2v_{1r}}{7f(1+k)v_{1n}}$, если $-\frac{2v_{1r}}{7f(1+k)v_{1n}} < 1$ и $\eta = 1$ в противном случае.

Возможности программы, разработанной по изложенным алгоритмам, представлены на рис.2-3.

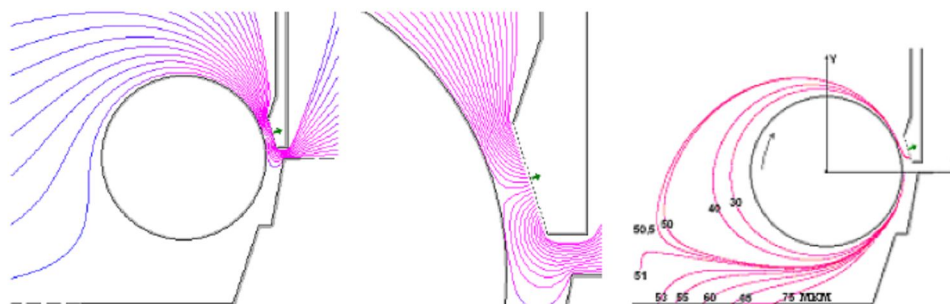


Рис. 2. Линии тока и траектории пылевых частиц
вблизи МВО от вальцетокарного станка

Компьютерная программа позволяет строить линии тока, определять скорости воздушного потока в любых точках области течения, строить траектории одиночных пылевых частиц с учетом их отскока от твердой поверхности в многосвязных двумерных областях произвольной конфигурации, в которой могут находиться вращающиеся цилиндры и (или) цилиндры-отсосы.

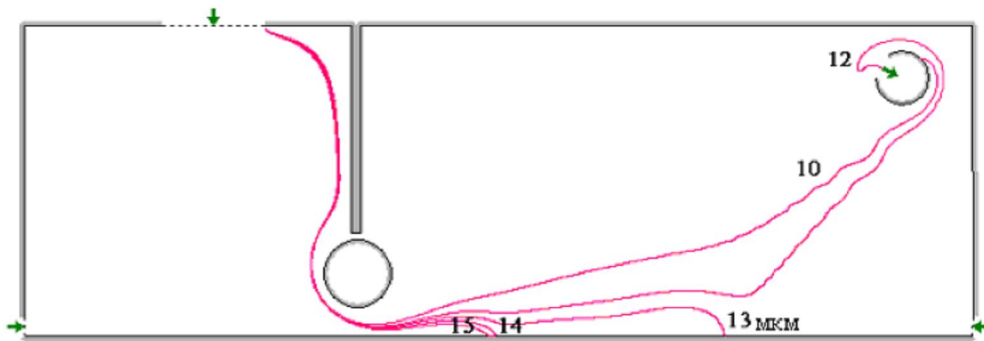


Рис. 3. Полет пылевых частиц при скорости вращения цилиндра против часовой стрелки 8 м/с и цилиндра-отсоса против часовой стрелки со скоростью 4 м/с

Метод дискретных вихрей [12-14] сохраняет преимущества метода ГИУ, но позволяет описывать вихревые нестационарные течения. МДВ использовался в работах Апарина В.А., Белоцерковского С.М., Белоцерковского О.М., Гайдаенко В.И., Ганделя Ю.В., Гомана О.Г., Гиневского А.С., Гуляева В.В., Довгий С.А., Желанникова А.И., Иванова П.Е., Карплюка В.И., Кибардина Ю.А., Котовского В.Н., Крицкого Б.С., Лифанова И.К., Локтева Б.Е., Ништа М.И., Подобедова В.А., Полонского Я.Е., Полтавского Л.Н., Ускова В.П., Судакова А.Г. для расчета вихревых течений возникающих при обтекании самолетов, вертолетов, скоростных поездов в туннелях, при проветривании карьеров, для оценки аэродинамического воздействия ветровых потоков на городскую территорию. В аэродинамике вентиляции он использовался для расчета щелевых отсосов в неограниченном пространстве (рис.4), отсоса под прямым двухгранным углом (рис.5), отсосов-раструбов, в том числе экранированных приточной струей над непроницаемой плоскостью и др. [4]. Были описаны вихревые течения внутри укрытия и укрытия с вращающимся цилиндром-отсосом. Найдено такое положение цилиндра-отсоса, при котором наблюдается наименьший унос пылевых частиц в аспирационную сеть.

Рассматривалась область течения с границей S , в каждой точке которой известна скорость вдоль вектора внешней нормали. В области находились M вращающихся цилиндров и цилиндров-отсосов с линейными скоростями вращения $v_k, k = 1, 2, \dots, M$. Для того чтобы учесть влияние вращения цилиндров на воздушный поток, в их центрах размещали вихри с циркуляциями $\Gamma_k = 2\pi R_k v_k$, где R_k – радиус k -го цилиндра.

Границу области, исключая контуры цилиндров, дискретизируем контрольными точками и присоединенными вихрями. В контрольных точках выполняются граничные условия для нормальной составляющей скорости. Шаг дискретности – расстояние между соседними присоединенными вихрями или контрольными точками приблизительно одинаков и равен h . На изломах границы области расположены присоединенные вихри. В рассматриваемых замкнутых областях количество присоединенных вихрей и расчетных точек одинаково. Контуры цилиндров дискретизируем набором N прямолинейных отрезков ΔS^k , на которых непрерывно размещены источники (стоки), интенсивность которых $q(\xi^k)$ не изменяется вдоль фиксированного отрезка.

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



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

c_k - точка центра k -го цилиндра; ξ^k - произвольная точка k -го отрезка. Скорость определяется из выражения:

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

где W – количество присоединенных вихрей; x^p , $p = 1, 2, \dots, N+W$ – точка центра p -го отрезка или расположения p -го присоединенного вихря; $\zeta^{l\tau}$ – точка расположения свободного вихря с циркуляцией $\gamma^{l\tau}$ в момент времени τ , сошедшего с l -ой острой кромки или гладкой поверхности.

В каждый расчетный момент времени вновь происходит сход новых свободных вихрей, которые движутся по траекториям жидких частиц без изменения их циркуляции, определяются новые положения свободных вихрей до этого находящихся в потоке и т.д.

Для вычисления концентрации пыли в вытяжном отверстии выбирается число l моментов времени поступления в область набора из s пылевых частиц. Осуществляется моделирование движения $l \cdot s$ частиц до тех пор, пока они все не осядут либо не будут уловлены отсосом. В процессе моделирования рассчитывается суммарная масса частиц, попавших в отсос. Выходная концентрация $C_{\text{вых}}$ при этом равна отношению этой массы к объему воздуха, который принес пылевые частицы в укрытие.

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

В результате моделирования по разработанным компьютерным программам:

- определены очертания вихревых областей на входе: в щелевидные отсосы-раструбы (рис.4), в щелевидные отсосы над прямым двухгранным углом (рис.5), в щелевые неплотности аспирационных укрытий при их механическом и аэродинамическом экранировании;
- исследовано вихревое течение у круглого отсоса-раструба, экранированного кольцевой приточной струей, натекающей на непроницаемую плоскую поверхность;
- смоделированы циркуляционные течения в замкнутом помещении (рис.6, [10]) и аспирационном укрытии;
- исследовано поведение пылевого облака, состоящего из пылевых частиц разной крупности, определено изменение концентрации и дисперсного состава аспирируемой пылевой аэрозоли в укрытиях различных типоразмеров и оборудованных вращающимся цилиндром-отсосом [5-9,11] (рис.7-8).

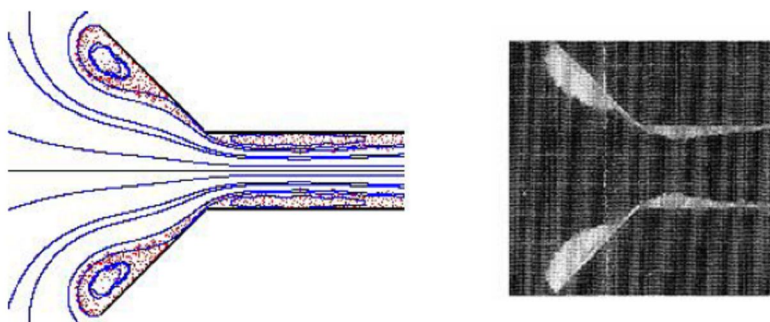


Рис. 4. Вихревое течение на входе в отсос-раструб
(расчетная и экспериментальная картины течения)

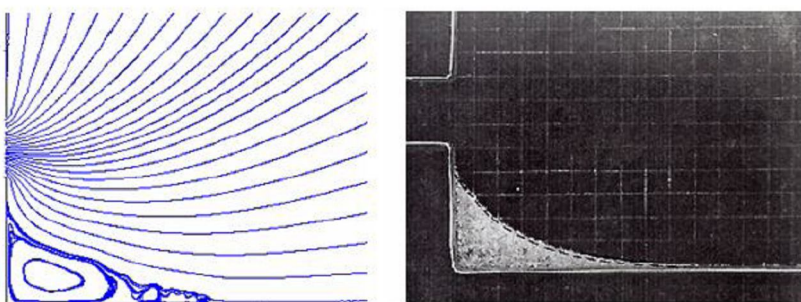


Рис. 5. Вихревое течение вблизи отсоса над прямым двухгранным углом
(расчетная и экспериментальная картины течения)

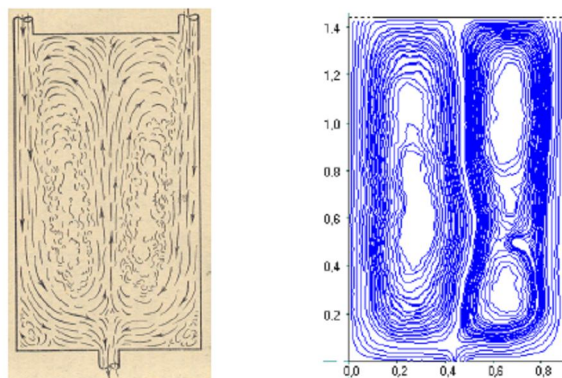


Рис. 6. Вихревое течение в модели с двумя приточными струями:
экспериментальная картина течения и расчетная картина течения

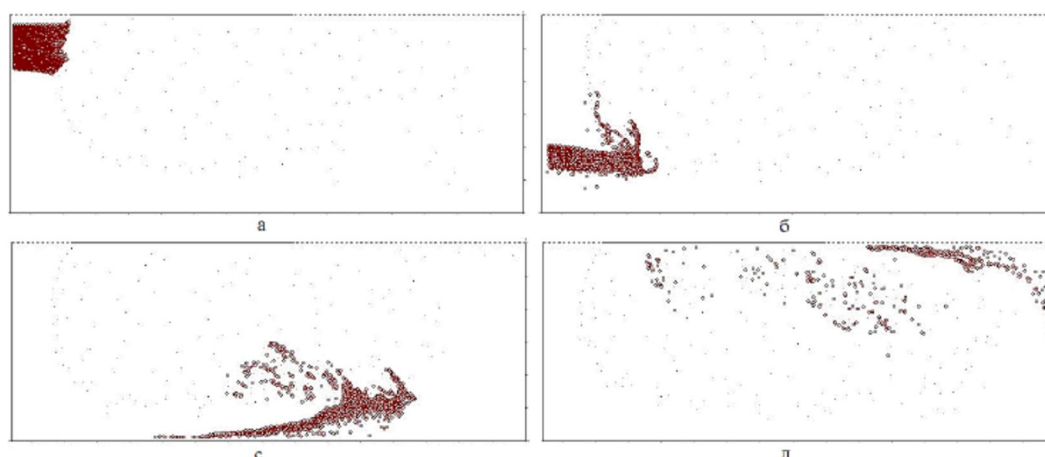


Рис. 7. Поведение пылевого облака, состоящего из 20000 пылевых частиц разной крупности

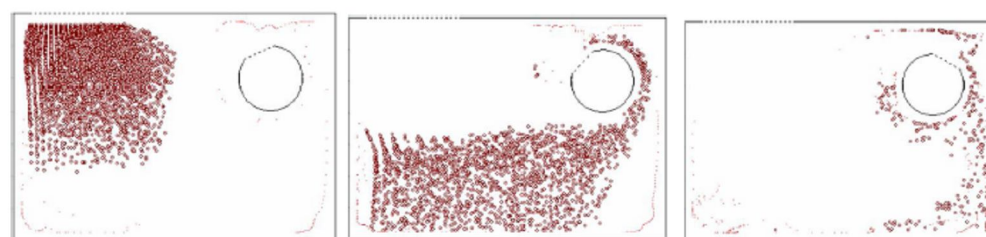


Рис. 8. Поведение пылевого облака с течением времени при скорости вращения цилиндра 2 м/с (точки – свободные вихри, кружочки – пылевые частицы)

Компьютерная реализация метода граничных интегральных уравнений позволила: определить поле скоростей, построить линии тока и траектории пылевых частиц в двумерных и трехмерных областях сложной конфигурации, внутри которой содержались вращающиеся цилиндры и цилиндры-отсосы.

Развитие метода дискретных вихрей, его комбинация с методом граничных интегральных уравнений, их компьютерная реализация позволила: описать нестационарные вихревые течения в местных отсосах открытого и закрытого типов в плоском приближении; исследовать динамику полифракционного пылевого облака, изменение концентрации и дисперсного состава пыли в аспирируемом воздухе в зависимости от геометрических и кинематических параметров укрытий и при их оборудовании вращающимися цилиндрами-отсосами; исследовать взаимодействие приточных струй и всасываемых воздушных потоков.

Дальнейшее направление исследований направлено на разработку алгоритмов и компьютерных программ расчета трехмерных вихревых нестационарных течений, несущих пылевую аэрозоль.

Литература

1. Лившиц Г.Д. Исследование вытяжных факелов местных отсосов методом "особенностей" [Текст] / Г.Д.Лившиц //Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1977. – № 4. – С.113-119.
2. Гиль Б.Л. Математическое моделирование с помощью ЭВМ всасывающих факелов местных отсосов, встроенных в оборудование [Текст] / Б.Л. Гиль // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1986. – №7 – С.90-93.
3. Лившиц Г.Д. О расчете всасывающих потоков местных отсосов [Текст] / Г.Д.Лившиц // «Инженерные системы» АВОК Северо-Запад. – 2005. - №3. – С. 25-28.

4. Логачев И.Н. Аэродинамические основы аспирации. [Текст] / И.Н.Логачев, К.И.Логачев. Санкт-Петербург: Химиздат. – 2005. – 659с.
5. Logachev K.I. Computational Modeling of Air-and-coal Flows next to Suction Holes / K.I.Logachev, I.N.Logachev, A.I.Puzanok // CD-proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2004, Jyvaskyla, 24–28 July 2004, 19 pages.
6. Логачев К.И. Численное исследование поведения пылевой аэрозоли в аспирационном укрытии [Текст] / К.И.Логачев, И.Н.Логачев, А.И.Пузанок // Известия вузов. Строительство. 2006. – №5. – С.73–78.
7. Логачев К.И. Компьютерное моделирование пылегазовых потоков в пульсирующих аэродинамических полях [Текст] / К.И.Логачев, А.И.Пузанок, В.Ю.Зоря // Вычислительные методы и программирование. 2006. Раздел 1. С.195-201 (<http://www.srcc.msu.su/num-meth>).
8. Konstantin I Logachev. Numerical study of aerosol dust behaviour in aspiration bunker / Konstantin I Logachev, Aleksei I Puzanok, Violetta U Zorya. // CD-proceedings European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006, Egmond aan Zee, The Netherlands, September 5-8, 2006, 11 pages.
9. Аверкова О.А. Моделирование пылегазовых потоков вблизи всасывающего отверстия в многосвязной области с вращающимся цилиндром [Текст] / О.А.Аверкова // Вычислительные методы и программирование. 2007. Т.8, №1. – С.33-38.
10. Аверкова О.А. Компьютерное моделирование циркуляционных течений в замкнутом помещении на основе метода дискретных вихрей [Текст] / О.А.Аверкова, В.Ю.Зоря, К.И.Логачев, Р.Ю.Овсянников // Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова. – 2007. - №3. – С.95-102.
11. Аверкова О.А. Особенности поведения пылевых аэрозолей в аспирационном укрытии стандартной конструкции [Текст] / О.А.Аверкова, В.Ю.Зоря, К.И.Логачев // Химическое и нефтегазовое машиностроение, №11, 2007.-С.34-36
12. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент [Текст] /И.К.Лифанов. – М.:Янус, 1995. – 520с.
13. Белоцерковский С.М. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей [Текст] / С.М.Белоцерковский, А.С.Гиневский. – М.:Физматлит, 1995.-368с.
14. Гоман О.Г. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости [Текст] / Гоман О.Г., Карплюк В.И., Ништ М.И., Судаков А.Г.; Под ред. М.И.Ништа. - М.: Машиностроение, 1993. - 288с.

APPLICATION OF A METHOD THE INTEGRATED EQUATIONS TO TASKS OF AERODYNAMICS OF VENTILATION

**O.A.AVERKOVA
A.N.ZAKUTSKIJ,
V.U.ZORYA,
K.I.LOGACHEV,
I.V.MIXAJLOV,
L.A.MIXAJLOVA**

*Belgorod State Technological
University named after V.G.
Shukhov
e-mail: kilogachev@intbel.ru*

The algorithms of numerical realization of a method of the integrated equations (boundary integrated equations and discrete whirlwinds) for currents of an ideal incompressible liquid in multicoherent areas with rotating cylinders are stated. The results of the decision of tasks пыле- and aerodynamics of ventilation received with the help of the developed computer programs are discussed. The measures of decrease(reduction) of economic expenses on creation and operation of systems of industrial ventilation are offered

Key words: aspiration, method of discrete vortices, computing methods.