УДК 533.6:628.5

© А. К. Логачев, аспирант
(Белгородский государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова)
E-mail: artlogachev93@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-188-193

© A. K. Logachev, post-graduate student
(Belgorod State Technological University
named after V. G. Shukhov)
E-mail: artlogachev93@gmail.com

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗДУШНОГО ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОГО УСТРОЙСТВА*

TO THE ISSUE OF MODELING THE AIR FLOW NEAR THE AIR INTAKE AND EXTRACTION UNIT

Разработан алгоритм расчета воздушного течения вблизи круглого отсоса, экранированного воздушной струей. Продемонстрировано удовлетворительное согласование расчетных величин скорости воздушного потока с экспериментальными данными разных авторов и расчетов, полученных путем численного решения уравнений Рейнольдса, замкнутых при помощи модели турбулентности — переноса сдвиговых напряжений (shear stress transport). Показано, что закрутка кольцевой воздушной струи, экранирующей отсос, существенно повышает дальность его действия и скорость подтекающего к нему воздуха.

Ключевые слова: местная вытяжная вентиляция, приточно-вытяжное устройство, метод дискретных вихрей, вихревой отсос.

The paper presents a developed computing algorithm of calculating of the air flow near a round shaped exhauster screened with an air stream. A satisfactory coordination of the estimated air flow speed values with the experimental data obtained by different researchers and the calculations received by the numerical solution of the Reynolds equations completed by means of the turbulence model (Shear Stress Transfer) is demonstrated. It is shown that the swirling of the suction shielding ring air stream significantly increases the range of its action and the speed of the approaching air flow.

Keywords: local exhaust ventilation, air intake and extraction system, discrete vortex method, vortex exhaust.

Введение

Местный вентиляционный отсос (МВО) является основным элементом системы промышленной вентиляции. Входная электрическая мощность на приводе или системе управления зависит от расхода воздуха, удаляемого МВО. Основная проблема промышленной вентиляции — снижение энергоемкости при сохранении свойств улавливания загрязняющих веществ [1–3]. Поэтому разработка методов повышения скорости воздуха, увлекающего загрязняющие вещества, при заданном расходе отсасываемого воздуха, а также методов расчета аспирационных [4], отрывных [5–8] и вихревых [9–10] течений является актуальной задачей.

Целью данной работы является оценка эффективности экранирования местного отсоса кольцевой прямооточной и закрученной воздушной струей.

1. Постановка задачи и основные расчетные соотношения

Круглый патрубок содержит всасывающий канал радиусом r и кольцевое отверстие с внутренним радиусом r_1 и внешним радиусом r_2 , из которого истекает приточная струя (рис. 1). Точка M удалена от входного сечения в канал на расстоянии l . Обозначим $r_2 - r_1 = d$; скорость внутри всасывающего канала v_0 ; скорость в кольцевом отверстии v_p .

Для решения задачи воспользуемся методом дискретных вихревых многоугольников [9].

Необходимо решить уравнение Лапласа

$$\Delta \varphi = 0,$$

* Исследования выполнены по гранту РФФИ №16-08-00074а и программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В. Г. Шухова.

Рис. 1. Приточно-вытяжное устройство

при заданном граничном условии для нормальной составляющей скорости $\frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_S = v_n(x) - U_n$, где ϕ — потенциал течения; x — точка граничной поверхности S . Функция U_n выражает влияние свободных вихрей, сходящихся с кромок трубы и кольцевого приточного отверстия.

Интегральный аналог уравнения Лапласа имеет следующий вид:

$$\iint_S G(x, \xi) \omega(\xi) d\sigma(\xi) = v_n(x) - \iint_\sigma \mu(\xi) G(x, \xi) d\sigma(\xi),$$

где $\omega(\xi)$ — плотность циркуляции вихревого слоя на граничной поверхности; $\mu(\xi)$ — плотность циркуляции вихревого слоя в области течения; ξ — произвольная точка поверхностей S или σ .

Функция влияния:

$$G(x, k) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{[(r_{i+1}^k - r_i^k) r_i^k]}{|r_{i+1}^k - r_i^k|^2 |r_i^k|^2 - ((r_{i+1}^k - r_i^k) r_i^k)^2} \times \\ \times \left(-\frac{(r_{i+1}^k - r_i^k) r_{i+1}^k}{|r_{i+1}^k|} + \frac{(r_{i+1}^k - r_i^k) r_i^k}{|r_i^k|} \right),$$

где $x(x_1, x_2, x_3)$ — произвольная внутренняя точка области; $r_i^k = \{A_{1i}^k - x_1, A_{2i}^k - x_2, A_{3i}^k - x_3\}$, $A_i^k (A_{1i}^k, A_{2i}^k, A_{3i}^k)$ — вершина многоугольной рамки, k — ее номер.

Скорость вычисляется при помощи скалярного произведения:

$$v_n(x) = (G(x, k) \cdot n) \Gamma(k),$$

где $\Gamma(k)$ — интенсивность (циркуляция) вихревой рамки; x — заданная точка; n — заданное единичное направление.

Далее вводится обозначение $G^{pk} = (G(x^p, k) \cdot n)$, где x^p — контрольная точка с номером p . Контрольные точки расположены посередине между

вихревыми рамками (рис. 2). Интенсивность Γ не изменяется вдоль вихревых рамок.

В произвольный момент времени $t = m \cdot \Delta t$ интенсивность присоединенных вихревых рамок определяется из следующей системы уравнений:

$$\sum_{k=1}^N G^{pk} \Gamma^k + \sum_{l=1}^3 \sum_{\tau=1}^m G^{p\tau l} \gamma^{\tau l} = v^p, \quad p = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Скорость воздушного течения в этот момент времени в точке x вдоль направления n определяется путем следующего суммирования:

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N G^k \Gamma^k + \sum_{l=1}^3 \sum_{\tau=1}^m G^{\tau l} \gamma^{\tau l}, \quad (2)$$

где G^k — функция влияния на заданную точку x вихревой рамки с циркуляцией Γ^k ; $G^{p\tau l}$ — функция влияния на граничную точку x^p рамки с циркуляцией $\gamma^{\tau l}$, сходящей с острой кромки l в соответствующий момент времени τ ; $G^{\tau l}$ — та же функция влияния, но только на внутреннюю точку x .

Далее снова происходит сход вихрей, старые вихри сдвигаются по направлению потока, заново определяются неизвестные интенсивности присоединенных вихрей из системы (1) и так далее, пока не останавливается вычислительный процесс.

Новые координаты вершин свободных рамок определяются из формул

$$x' = x + v_x \cdot \Delta t, \quad y' = y + v_y \cdot \Delta t, \quad z' = z + v_z \cdot \Delta t,$$

где (x, y, z) — координаты предыдущего положения вершин, $\{v_x, v_y, v_z\}$ — координаты вектора

Рис. 2. Дискретизация границы области

скорости воздушного потока (определяются по формуле (2) при $\vec{n} = \{1, 0, 0\}$, $\vec{n} = \{0, 1, 0\}$, $\vec{n} = \{0, 0, 1\}$ соответственно).

Если данная точка приближена к вихревой рамке на расстояние, меньшее радиуса дискретности, то ее влияние на эту точку не учитывается.

В каждый модельный момент времени в воздушный поток сходят три вихревые рамки с циркуляциями, равными циркуляциям рамок, расположенных на срезах входного и приточного кольцевого отверстий. Циркуляции свободных вихревых рамок остаются постоянными с течением времени, в отличие от их расположения, которое изменяется.

2. Результаты расчета и их обсуждение

Для проверки достоверности расчетов произведены вычисления скорости на оси OX (рис. 3), без действия кольцевой струи. Расчеты практически совпадают с экспериментальными данными.

Без действия отсоса проведены расчеты профилей осевой составляющей скорости вблизи кольцевой приточной струи при $R_0 = r_2 = 43,5$ мм, скорости истечения приточной струи $u_0 = 6,48$ м/с (рис. 4), исследовавшиеся экспериментально [11]. Расчеты при помощи метода дискретных вихрей (МДВ) производились при шаге по времени 0,0015 и расстоянии между соседними вихрями 0,005. Расчеты в ANSYS-FLUENT [12] показаны на рис. 4. Численный метод решения задачи основывался на использовании уравнений Рейнольдса с привлечением распространенной модели переноса сдвиговых напряжений SST (shear stress transport) [13] с поправками Спаларта–Шура на кривизну и враще-

Рис. 3. Сравнение расчетов по методу дискретных вихрей (сплошная линия) с экспериментом Alden [10] (черные кружки) и кривой В. Н. Посохина [2] (пунктирная линия)

ние (curvature correction, или CC) [14]. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными. Картина течения представлена на рис. 4, в. Величины скорости безразмерны и отнесены к u_0 .

Визуальное сравнение полученных профилей осевой составляющей скорости (рис. 5) указывает на их удовлетворительное согласование. Коэффициенты корреляции $r \pm dr$ для МДВ (таблица) в основном высокие по шкале Чеддока, по методам SST, SST_CC — очень высокие. Значения критериев Стьюдента t демонстрируют хорошие совпадения средних значений с экспериментом. Разброс относительно среднего, вычисленного с помощью критерия Фишера F , в одном случае для МДВ при $x/(2r) = 0,78$ выпадает за критическое значение.

При действии отсоса и приточной кольцевой струи расчеты при помощи МДВ производились при длине трубы 1 м; радиусах $r = 0,1$ м, $r_1 = 0,16$ м, $r_2 = 0,2$ м; внешнем радиусе трубы $R = 0,25$ м; скорости всасывания внутри трубы $v_0 = 1$ м/с; количестве круговых рамок 100; количестве отрезков в рамке 16; шаге дискретности 0,005 м; скорости притока v_p 5, 10 и 15 м/с; шаг по времени вычислялся путем деления шага дискретности на скорость истечения струи и соответственно был равен: 0,001 с, 0,0005 с и 0,000067 с. Производилось моделирование до 1000–1300-го шага по времени (в отличие от [15], где усреднение осуществлялось от 200 до 400-го шага по времени). Вихри заполняли пространство на удалении 10 калибров от входа во всасывающий канал, затем расчет прекращался и производилось еще 200–400 шагов по времени, при этом скорость за эти шаги усреднялась. При помощи SST расчеты проводились при тех же геометрических параметрах, скоростях v_0 и v_p .

Характер изменения осевой скорости при расчетах разными методами похож (рис. 6). Цифры 5, 10, 15 на рисунке обозначают безразмерные скорости истечения кольцевой струи.

При удалении от входа во всасывающий канал скорость возрастает, достигает максимума, убывает и меняет свой знак. В последнем случае это означает, что кольцевая струя смыкается и далее воздух распространяется в противоположную от всасывающего канала сторону. Длина области, где воздушное экранирование кольцевой

Рис. 4. Расчеты в ANSYS-FLUENT: а — размеры области; б — шкала величин скорости; в — картина течения

Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных [10] с расчетами разными методами

Сравнение расчетных и экспериментальных величин продольной составляющей скорости u_x/u_0

Метод расчета	$x/(2r)$	N	$r \pm dr$	t	F
SST	0,61	20	$0,99 \pm 0,004$	0,75	1,65
SST_CC	0,61	20	$0,99 \pm 0,004$	0,75	1,67
МДВ	0,61	20	$0,87 \pm 0,055$	0,56	1,11
SST	0,78	20	$0,97 \pm 0,013$	1,10	2,04
SST_CC	0,78	20	$0,97 \pm 0,013$	1,08	2,06
МДВ	0,78	20	$0,89 \pm 0,045$	0,37	2,28
SST	0,95	20	$0,93 \pm 0,028$	0,97	1,85
SST_CC	0,95	20	$0,93 \pm 0,028$	0,95	1,88
МДВ	0,95	20	$0,93 \pm 0,029$	0,60	2,40
SST	2,16	12	$0,96 \pm 0,023$	0,22	1,12
SST_CC	2,16	12	$0,96 \pm 0,025$	0,21	1,15
МДВ	2,16	12	$0,85 \pm 0,079$	0,58	1,75
SST	2,45	13	$0,96 \pm 0,021$	0,06	1,16
SST_CC	2,45	13	$0,96 \pm 0,022$	0,04	1,18
МДВ	2,45	13	$0,80 \pm 0,100$	0,53	1,64

приточной струей увеличивает скорость подтекания, равна 2–2,5 калибра (калибр — радиус всасывающего канала) для расчетов методом SST. При расчетах по МДВ длина этой области изменяется от 2,5 до 3 калибров. В случае закрутки струи с интенсивностью 0,904 протяженность данной области существенно увеличивается — до 14 калибров. Здесь расчет производился методом SST, расчет закрученной струи при помощи МДВ по данному алгоритму невозможен. Под интенсивностью закрутки понималась величина $S_0 = \int_{r_1}^{r_2} \rho U W r^2 dr / r_2 \int_{r_1}^{r_2} \rho U W r dr$, где ρ — плотность газа, а U и W — осевая и окружная компоненты скорости.

Выводы

На основании метода дискретных вихревых многоугольных рамок разработана математическая модель и компьютерная программа для расчета поля скоростей в спектре действия круглого

Рис. 6. Изменение величины осевой скорости воздушного потока при удалении от входного сечения всасывающего канала: 1 — расчет методом SST при экранировании прямооточной воздушной струей; 2 — расчет при помощи МДВ при экранировании прямооточной воздушной струей; 3 — расчет методом SST при экранировании закрученной воздушной струей

всасывающего канала, экранированного кольцевой турбулентной струей, охватывающей вытяжное отверстие. Произведена серия вычислительных экспериментов, на основании которых показано, что экранирование круглого отсоса только прямооточной кольцевой струей позволяет значительно повысить скорость подтекающего к нему воздуха в диапазоне 2–3 калибров удаления от него. Закрутка струи позволяет увеличить длину этой области в несколько раз.

Библиографический список

1. Посохин В. Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования. М.: Машиностроение, 1984. 160 с.
2. Посохин В. Н. Аэродинамика вентиляции. М.: АВОК-Пресс, 2008. 212 с.
3. Логачев И. Н., Логачев К. И., Аверкова О. А. Энергосбережение в аспирации. М.; Ижевск: РХД, 2013. 504 с.
4. Хоперсков А. В., Шафран Ю. В., Бутенко М. А. Численное моделирование вентиляционных течений в промышленных помещениях // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 2. С. 98–102.
5. Аверкова О. А., Логачев И. Н., Логачев К. И., Логачев А. К. Закономерности отрывного течения при входе в выступающий канал с экранами // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. XLIV, № 2. С. 33–49.
6. Логачев И. Н., Логачев К. И., Зоря В. Ю., Аверкова О. А. Моделирование отрывных течений вблизи

всасывающей щели // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11, № 1. С. 43–52.

7. Логачев И. Н., Логачев К. И., Аверкова О. А. Математическое моделирование отрывных течений при входе в экранированный плоский канал // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11, № 1. С. 68–77.
8. Аверкова О. А., Логачев И. Н., Логачев К. И. Моделирование отрыва потока на входе во всасывающие каналы в областях с разрезами // Вычислительные методы и программирование. 2012. Т. 13, № 2. С. 298–306.
9. Белоцерковский С. М., Гиневский А. С. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. М.: Физматлит, 1995. 367 с.
10. Alden J. L. Design of Industrial Exhaust Systems. N. Y.: Industrial Press, 1982. 280 p.
11. Vanierschot M., van den Bulck E. Numerical study of hysteresis in annular swirling jets with a stepped-conical nozzle // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2007. Vol. 54. Pp. 313–324.
12. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of experience with the SST turbulence model // Proceedings of 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. 2003. Pp. 625–632.
13. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST Turbulence Model to Rotation and Curvature by Applying the Spalart–Shur Correction Term // Journal of Turbomachinery. 2009. Vol. 131, № 4. P. 0410104 (8 pages).
14. Mathur S. R., Murthy J. Y. A pressure-based method for unstructured meshes // Numerical Heat Transfer. 1997. Vol. 32. Pp. 195–215.
15. Логачев К. И., Аверкова О. А., Логачев А. К., Толмачева Е. И., Горлов А. С. О методе численного модели-

рования отрыва потока на входе в круглый тонкостенный патрубок // Вычислительные методы и программирование. 2016. Т. 17. № 2. С. 189–196.

References

1. Posokhin V. N. *Raschet mestnykh otsosov ot teplo- i gazovydelyayushchego oborudovaniya* [Calculation of local exhausts from the heat- and gas-yielding equipment.]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1984, 160 p.
2. Posokhin V. N. *Aerodinamika ventilyatsii* [Ventilation aerodynamics]. Moscow, AVOK-Press Publ., 2008. 212 p.
3. Logachev I. N., Logachev K. I., Averkova O. A. *Ehnergoberezhenie v aspiratsii* [Energy saving in aspiration]. Moscow, Izhevsk, RKhD Publ., 2013, 504 p.
4. Khoperskov A. V., Shafran Yu. V., Butenko M. A. *Chislennoe modelirovanie ventilyatsionnykh techeniy v promyshlennykh pomeshcheniyakh* [Numerical modeling of ventilating streams in industrial premises]. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik – Southern Siberian Scientific Bulletin*, 2014, no. 2, pp. 98–102.
5. Averkova O. A., Logachev I. N., Logachev K. I., Logachev A. K. *Zakonomernosti otryvnogo techeniya pri vkhode v vystupayushchiy kanal s ehkranami* [Regularities of detachable air flow at the entrance into the acting channel with screens]. *Uchenye zapiski TsAGI – Scientific Notes*, 2013, vol. XLIV, no. 2, pp. 33–49.
6. Logachev I. N., Logachev K. I., Zorya V. Yu., Averkova O. A. *Modelirovanie otryvnykh techeniy vblizi vsasyvayushchey shcheli* [Modeling of detachable currents near the suction slot]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye – Computing methods and programming*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 43–52.
7. Logachev I. N., Logachev K. I., Averkova O. A. *Matematicheskoe modelirovanie otryvnykh techeniy pri vkhode v ehkranirovanny ploskiy kanal* [Mathematical modeling of detachable streams at the entrance to the screened flat channel]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye – Computing methods and programming*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 68–77.
8. Averkova O. A., Logachev I. N., Logachev K. I. *Modelirovanie otryva potoka na vkhode vo vsasyvayushchie kanaly v oblastiakh s razrezami* [Modeling of the stream's separation on the entrance to the suction inlet channels in sections with cuts]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye – Computing methods and programming*, 2012, vol. 13, no. 2, pp. 298–306.
9. Belotserkovskiy S. M., Ginevskiy A. S. *Modelirovanie turbulentnykh struy i sledov na osnove metoda diskretnykh vikhrey* [Modeling of turbulent streams and traces on the basis of the method of discrete whirlwinds]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1995, 367 p.
10. Alden J. L. *Design of Industrial Exhaust Systems*. New York, Industrial Press Publ., 1982, 280 p.
11. Vanierschot M., van den Bulck E. Numerical study of hysteresis in annular swirling jets with a stepped-conical nozzle. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2007, vol. 54, pp. 313–324.
12. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. *Ten years of experience with the SST turbulence model*. Proc. of 4th Int. Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003, pp. 625–632.
13. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST Turbulence Model to Rotation and Curvature by Applying the Spalart–Shur Correction Term. *Journal of Turbomachinery*, 2009, vol. 131, no. 4, Report no. 0410104.
14. Mathur S. R., Murthy J. Y. A pressure-based method for unstructured meshes. *Numerical Heat Transfer*, 1997, vol. 32, pp. 195–215.
15. Logachev K. I., Averkova O. A., Logachev A. K., Tolmacheva E. I., Gorlov A. S. *O metode chislennogo modelirovaniya otryva potoka na vkhode v kruglyy tonkostennyy patrubok* [About the method of numerical modeling of the stream's separation on the entrance to a round thin-walled branch pipe]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye – Computing methods and programming*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 189–196.