

Развитие метода "дискретных вихрей" в приложении к синтезу геометрии
лопаток промышленных осевых вентиляторов

Петров Н.Н., Грехнёва Е.Ю.

Учреждение Российской академии наук Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

Development of the method "of discrete vortices" in application to the synthesis
of geometry blades industrial axial fans

Petrov N.N., Grehneva E.Y.

Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia

Для обеспечения безопасности в выработках шахт, рудников, в тоннелях метрополитена требуются большие воздухообмены. Следовательно, требования к вентиляционной технике очень высоки. Сердцем вентиляторов является лопаточная система рабочего колеса. Для определения геометрии лопаточных венцов вентилятора, которые обеспечивали бы получение требуемых аэродинамических параметров, может быть сформулирована обратная задача обтекания решетки профилей. В отечественной литературе для решения обратной задачи проектирования решеток рабочих колес широко используется метод «дискретных вихрей». Этот метод был использован институтом горного дела СО РАН, научно-исследовательским и опытно-конструкторским институтом «АЭРОТУРБОМАШ» совместно с институтом гидродинамики им. Лаврентьева для разработки метода синтеза геометрии для поворотных на ходу лопаток рабочих колес реверсивных осевых вентиляторов серии ВО.

Требования к вентиляторам непрерывно усложняются с появлением новых объектов и технологических процессов. При этом часто не представляется возможным использовать выпускаемые вентиляторы или даже положить в основу разрабатываемых вентиляторов известные аэродинамические схемы. Возникает необходимость создания вентилятора новой аэродинамической схемы, обеспечивающей получение заданных аэродинамических, акустических, весовых и габаритных параметров при высоком КПД.

В рамках работ, проводимых указанными институтами, было показано, что регулируемые и реверсивные вентиляторы диаметром 2400 мм и меньше не целесообразно выполнять с поворотными на ходу лопатками. Следовательно, для создания рабочих колес реверсивных и

регулируемых на ходу вентиляторов малой мощности необходимо рассматривать способ их регулирования и реверсирования изменением соответственно частоты и направления вращения.

Группой исследователей (В. Г. Караджи, Ю.Г. Московко, И. В. Брусиловский и др.) установлено [1], что достаточные реверсивные характеристики неповоротно-лопастных рабочих колес обеспечиваются при использовании лопаток S-образной формы. Однако методы расчета геометрии таких лопаток недостаточно разработаны.

В истории развития методов проектирования лопаточных систем, т. е. выбора их геометрических параметров, можно выделить 3 основных подхода.

1. Когда не было ни систематических испытаний плоских решеток, ни хорошо разработанной теории их потенциального обтекания, применялся метод профилирования, основанный на имевшихся результатах многочисленных испытаний изолированных профилей [2]. Этот метод был широко распространен и применялся также для профилирования компрессоров, где он получил свое дальнейшее развитие [3].

Большое отличие моделей от реальных условий и недостаточность экспериментальных данных для различных сочетаний множественных исходных параметров привели к тому, что стала актуальной задача поиска новых подходов для аэродинамического проектирования решеток. В том числе, создание и развитие методов решения обратных задач обтекания решеток.

2. Второй подход предполагает разработку различных методов решения обратных краевых задач аэродинамики (ОКЗА) (см. работу [4] и библиографию к ней).

3. Третий подход в проектировании решеток заключается в использовании различных методов численной оптимизации, основанных на решении прямых задач обтекания решетки с привлечением тех или иных итерационных алгоритмов решения задач гидрогазодинамики.

В отечественной литературе в работах В. А. Руденко, И. А. Беззубко и др. [5] подробно представлено решение обратной задачи обтекания многорядной лопаточной решетки на основе решения прямых задач методом «дискретных вихрей», разработанным группой авторов под руководством С. М. Белоцерковского [6, 7]. Этот метод был применен нами в ходе решения задачи расчета геометрических параметров решетки рабочего колеса реверсивного осевого вентилятора.

Н.Е. Жуковский впервые предположил, что обтекание замкнутой кольцевой решетки профилей, расположенной на поверхности цилиндра, цилиндрическим потоком происходит так же, как обтекание соответствующей ей бесконечной плоской решетки плоскопараллельным потоком. Эта гипотеза хорошо подтверждается опытом. Таким образом, изучение обтекания

лопаточных венцов осевого вентилятора в основе своей сводится к рассмотрению плоских решеток.

При исследовании обтекания решетки сдвоенных лопастей рабочего колеса вводятся предположения, которые берутся за основу математической модели: 1) лопасти колеса тонкие; 2) среда моделируется идеальной несжимаемой жидкостью; 3) течение потенциально; 4) справедлива гипотеза цилиндрических сечений.

В рамках введенных предположений, основываясь на гидродинамической теории решеток с использованием математического аппарата теории функций комплексного переменного можно прийти к системе сингулярных интегральных уравнений относительно интенсивности вихрей $\gamma_j(\xi_j)$ [8]:

$$\operatorname{Im} \left\{ e^{i\alpha_m} \left[\frac{1}{2ih} \sum_{j=1}^2 \int_{L_j} \gamma_j(\xi_j) (\operatorname{cth} \pi(z_m - \xi_j) + 1) d\xi_j + V_\infty \right] \right\} = 0. \quad (1)$$

Дополнительные условия, накладываемые на рассматриваемое течение, могут быть сформулированы относительно функции $\gamma_j(\xi_j)$: 1) постоянство циркуляции скорости потока вокруг профилей решетки для всех цилиндрических сечений; 2) безударность входа потока в решетку, т.е. равенство касательных скоростей жидкости у передней кромки и снизу профиля.

Для решения полученной системы сингулярных уравнений использовался метод "дискретных вихрей", идея которого состоит в следующем [6]. Непрерывный вихревой слой, моделирующий несущую поверхность и след за нею, заменяется системой дискретных вихрей. На несущей поверхности выбираются точки, называемые контрольными (расчетными), в которых выполняется условие непротекания. Задача нахождения неизвестных циркуляций дискретных вихрей сводится к системе линейных алгебраических уравнений.

Дискретные вихри на профиле и контрольные точки, в которых выполняется граничное условие о непротекании, размещаются следующим образом. "Профиль" разбиваем на конечное число отрезков. На каждом отрезке на $1/4$ от его начала помещаем вихрь, а на $3/4$ – контрольную точку. Как показали численные расчеты [7], такое разбиение обеспечивает выполнение условий на кромках – при увеличении числа разбиений циркуляции вихрей на передней кромке стремятся к бесконечности, а на задней – к нулю.

Задача нахождения неизвестных циркуляций дискретных вихрей сводится к системе линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{j=1}^2 A_{ij} \Gamma_j = B_i, \quad (i = 1, 2), \quad (2)$$

где A_{ij} – матрица с элементами – функциями геометрических параметров решетки, V_i – вектор из нормальных составляющих скорости набегающего потока в контрольных точках профилей, $\Gamma_j = \{\gamma_{nj}^j\}$ – вектор, компонентами которого являются дискретные вихри профилей.

Система линейных алгебраических уравнений (2) решается численно методом Гаусса с выбором максимального элемента.

В результате получим значение суммарной циркуляции вокруг профилей решетки в каждом сечении лопатки: $\Gamma_i = \sum_{k=1,2} \gamma_i(\xi_k)$, $i=1..m$, m – количество выбранных сечений. Далее вводим целевую функцию: $f_i = |\Gamma_k - \Gamma_i|$, где i – номер сечения. При этом f_i – функция от параметров, определяющих геометрию решетки.

Дальнейшая задача сводится к нахождению минимума целевой функции f_i . Для решения этой задачи необходимо использовать один из методов оптимизации функций многих переменных, подробно описанных в работе [9].

Количество варьируемых параметров можно сократить, используя дополнительные условия.

При проектировании рабочих колес вентиляторов серии ВО с поворотными на ходу лопатками таким дополнительным условием является задача минимизации момента центробежных сил, действующих на лопатку и задача центрирования профилей на поворотном основании [10,12].

При проектировании рабочих колес неповоротно-лопастных вентиляторов с S-образными лопатками в качестве дополнительного условия было выбрано взаимное расположение лопастей в решетке.

Для сдвоенных лопастей, имеющих форму дужек, был проведен численный анализ относительных эпюр скоростей вдоль поверхностей “профилей” и определено расположение лопастей, наиболее полно соответствующее заданным требованиям [11].

Нами был проведен численный анализ относительных эпюр скоростей вдоль поверхностей S-образных “профилей” (рис.1), который позволил оценить эффективность обтекания решетки, диапазон рациональных режимов ее использования, а также возможность возникновения отрыва потока.

Значения индуктивной скорости в точках расположения вихрей i для каждого из “профилей” определяется из выражения

$$\omega_{tin} = - \sum_{n=1}^2 \sum_{k=1}^{i-1} \gamma_{kn} \varphi_{tkin} - \sum_{n=1}^2 \sum_{k=i+1}^{m_n} \gamma_{kn} \varphi_{tkin},$$

где φ_{tkin} - составляющая безразмерной скорости, касательной к поверхности n-го "профиля" сдвоенной решетки, вызванная k-ым вихрем в точке расположения i-го вихря.

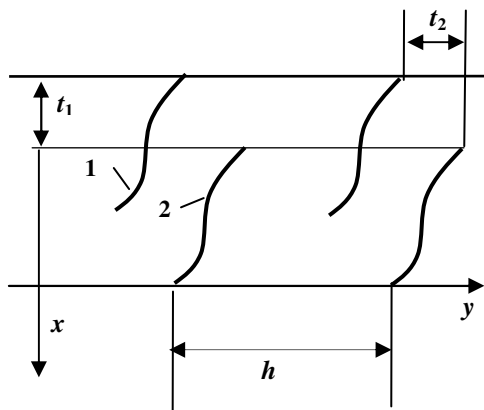


Рис. 1. Взаимное расположение сдвоенных лопастей рабочих колес: h – шаг решетки, t_1 – расстояние между "профилями" по оси x , t_2 – расстояние между "профилями" по оси y

Было проведено численное исследование обтекания "профилей" при различных значениях параметров t_1 и t_2 , при этом значения параметра t_1 изменялись в диапазоне $0 \div 35 \cdot h$, а параметр t_2 – в диапазоне $0.05 \cdot h \div 0.25 \cdot h$.

На рис.2 показаны относительные скорости сверху и снизу "профилей" при различных значениях параметров t_1 и t_2 : а) $t_1=0, t_2=0.25h$, б) $t_1=0.18h, t_2=0.15h$.

Из графиков видно, что в первом варианте на входе в "профили" наблюдаются значительные градиенты скорости, которые могут привести к возникновению в реальном течении местных отрывных зон. Во втором случае имеет место наиболее эффективный для решеток тонких S-образных "профилей" режим обтекания.

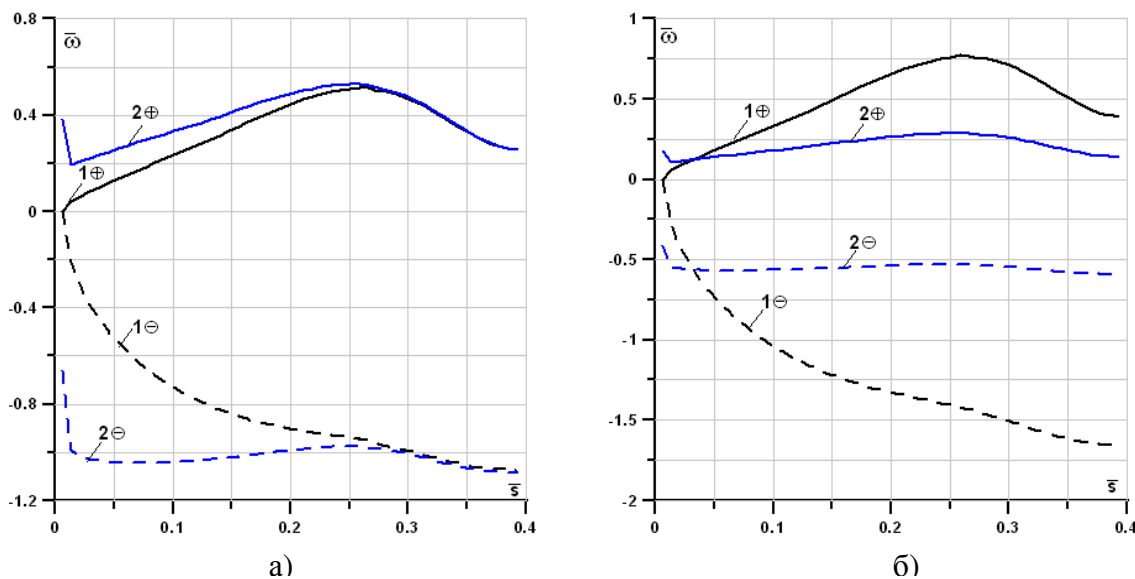


Рис.2 относительные скорости сверху и снизу профилей при различных значениях параметров t_1 и t_2 : а) $t_1=0, t_2=0.25h$, б) $t_1=0.18h, t_2=0.15h$

Таким образом, в результате решения данной задачи можно получить оптимальную геометрию решетки, которая бы обеспечила: "безударный" и "безотрывной" режим обтекания при заданном значении скорости на входе в решетку с шагом h и циркуляцию скорости Γ_k вокруг "профиля" решетки.

Данные исследования позволили разработать аэродинамические схемы и конструкции рабочих колес осевых вентиляторов серии ВО с поворотными на ходу лопатками [12], а так же реверсивных неповоротно-лопастных вентиляторов местного проветривания диаметром 1000, 1200 мм [13].

Список литературы:

1. Брусиловский И. В. Аэродинамика и акустика осевых вентиляторов. Труды ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского // М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2004, вып. 2650.
2. Ушаков К. А. Аэродинамический расчет осевого вентилятора // Труды ЦАГИ, 1936, № 277.
3. Стефановский В. А. Осевые компрессоры // Оборонгиз, 1946, Ч.1.
4. Тумашев Г. Г., Нужин М. Т. Обратные краевые задачи // Механика, Учен. записки Казанского гос. ун-та, 115, №6, Казанский гос. ун-т, Казань, 1955, с. 3-167.
5. Руденко В. А., Беззубко И. А. Решение обратной задачи аэродинамического расчета рабочего колеса осевых вентиляторов с многорядными лопаточными решетками // Стационарное оборудование шахт: Сборник научных трудов ВНИИГМ им. М. М. Федорова, Донецк, 1987, с.151-156.
6. Белоцерковский С. М., Ништ М. И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью // М.: Наука, 1978.
7. Белоцерковский С. М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике // М.: "Наука", 1985.
8. Юдин В.А., Чернышева О.В. Обтекание двойной решетки профилей // Динамика сплошной среды. - Новосибирск: ИГиЛ СО РАН. - 1993, - № 106. - с. 161-172.
9. Сухарев А. Г., Тимохов А. В., Федоров В. В. Курс методов оптимизации // М.: Наука, 1986, 367 с.
10. Батяев Е.А. Аэродинамическое проектирование регулируемых сдвоенных решеток осевых вентиляторов // Теплофизика и аэромеханика. – 2000.-Т. 7, №2. с. 209-215.
11. Руденко В. А, Манянина А. С. Расчет эпюр скоростей при обтекании профилей сдвоенных лопаток осевых вентиляторов.// Сборник научных трудов, Донецк 1980, стр. 119-121.
12. Петров Н.Н., Попов Н.А., Батяев Е.А., Новиков В.А. Теория и проектирование реверсивных осевых вентиляторов с поворотными на ходу лопатками рабочего колеса // ФТПРПИ. - 1999. - № 5. - с. 79-92.
13. Петров Н.Н., Грехнёва Е.Ю. Разработка аэродинамических схем для реверсивных вентиляторов местного проветривания // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды международной научно-практической конференции – Кемерово: Сибирское отделение Российской академии наук, Кемеровский научный центр СО РАН, Институт угля СО РАН, Кузбасский государственный технический университет, ООО КВК "Экспо-Сибирь", 2010, с.53-55