

УДК 621.634-253.5:533.6

Е.Ю. Грехнёва

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА "ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕЙ" В ПРИЛОЖЕНИИ  
К РАСЧЕТУ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СДВОЕННЫХ ЛОПАТОК  
РАБОЧИХ КОЛЕС РЕВЕРСИВНЫХ, НЕПОВОРОТНО-ЛОПАСТНЫХ ОСЕВЫХ  
ВЕНТИЛЯТОРОВ**

Для обеспечения безопасности в выработках шахт, рудников, в тоннелях метрополитена требуются большие воздухообмены. Следовательно, требования к вентиляционной технике очень высоки и непрерывно изменяются 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 аэrodинамической схемы, обеспечивающей получение заданных аэродинамических, акустических, весовых и габаритных параметров при высоком КПД.

В рамках работ, проводимых ИГД СО РАН, научно-исследовательским и опытно-конструкторским институтом «Аэротурбомаш» совместно с Институтом гидродинамики им. Лаврентьева, было показано, что вентиляторы диаметром от 2400 мм и меньше нецелесообразно 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 отечественной литературе для решения обратной задачи проектирования решеток рабочих колес широко используется метод "дискретных вихрей" [2]. Этот метод был применен нами в ходе решения задачи расчета геометрических параметров решетки рабочих колес реверсивных вентиляторов.

При решении задачи обтекания сдвоенных S-образных лопастей рабочего колеса осевого вентилятора, принятые следующие допущения. Для простоты полагаем, что среда моделируется идеальной несжимаемой жидкостью, а течение – потенциально. Будем считать лопатки тонкими. В рамках введенных предположений, основываясь на гидродинамической теории решеток и теории функций комплексного переменного можно принять к системе сингулярных интегральных уравнений относительно интенсивности вихрей [3]

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

для решения которой используется метод "дискретных вихрей", идея которого состоит в следующем. 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.

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.

Задача нахождения неизвестных циркуляций дискретных вихрей сводится к системе линейных алгебраических уравнений, которая решается численно методом Гаусса с выбором максимального элемента. Дальнейшая задача сводится к нахождению минимума целевой функции, представляющей собой модуль разности между требуемой суммарной циркуляцией вокруг профилей и найденной в результате решения поставленной задачи. При этом целевая функция – функция от параметров, определяющих геометрию решетки [4].

На рис. 1 приведен пример расчета геометрических параметров решетки рабочего колеса реверсивного осевого вентилятора  $D = 1000$  мм.

Показанная на рис. 1 лопаточная система была рассчитана при условии "безударного" и безотрывного обтекания решетки лопастей. Однако в реальных течениях при больших углах атаки с лопастей рабочих колес турбомашин происходит отрыв потока.

Особенность обтекания решеток тонких лопастей состоит в том, что в широком диапазоне изменения углов атаки набегающего потока отрыв потока происходит лишь с их кромок. Отрыв потока влияет на аэродинамические характеристики решетки профилей, на величину силового аэродинамического взаимодействия решетки с потоком. Так же практический интерес представляет влияние отрыва потока на КПД решетки.

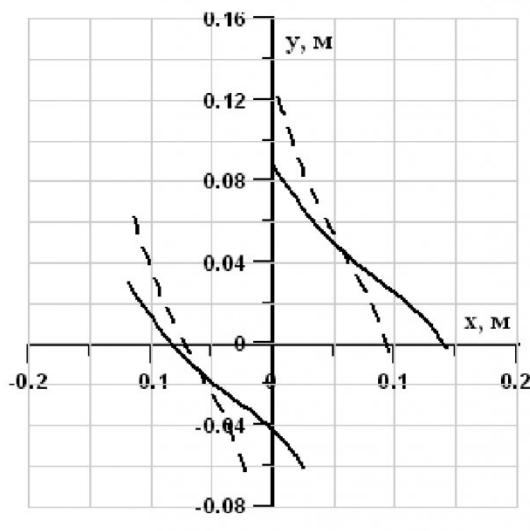
В работе [5] предложен метод решения задач об отрывном обтекании решетки тонких профи-

лей. Предложенный метод основан на осреднении по времени подлежащей определению завихренности жидкости в фиксированных точках вихревых следов, сбегающих с кромок профиля, и на моделировании следов с осредненной завихренностью вихревыми слоями. Аэродинамические характеристики профиля определяются этим методом с точностью до величин второго порядка малости  $\varepsilon = \alpha - \alpha_0$  по отношению к характеристикам, определяемым путем решения начально-краевой задачи, где  $\alpha, \alpha_0$  – угол атаки и угол "бездарного входа", при котором происходит безотрывное обтекание. В данной работе предложенный в [5] метод был применен к решению задачи об отрывном обтекании решетки тонких S-образных профилей.

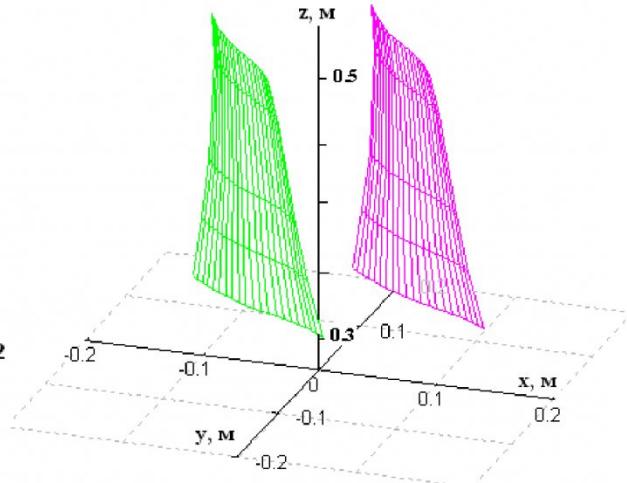
Геометрия решетки S-образных профилей определяется шагом  $h$ , углом выноса  $\beta$ , хордой профилей  $b$  и функцией формы профилей  $f(x)$  (рис.2).

Функция, описывающая S-образный профиль, задается в виде:

$$f(x) = \begin{cases} E_1(x), & 0 \leq x \leq x_c / 2; \\ E_2(x), & x_c / 2 \leq x \leq x_c; \\ E_3(x), & x_c \leq x \leq (b + x_c) / 2; \\ E_4(x), & (b + x_c) / 2 \leq x \leq b, \end{cases}$$



a



б

Рис. 1. Результат расчета геометрии лопаток рабочего колеса диаметром 1000 мм: а) "профили" лопаток в привтулочном (сплошная линия) и периферийном (пунктирная линия) сечениях, б) трехмерный вид сдвоенной лопатки рабочего колеса

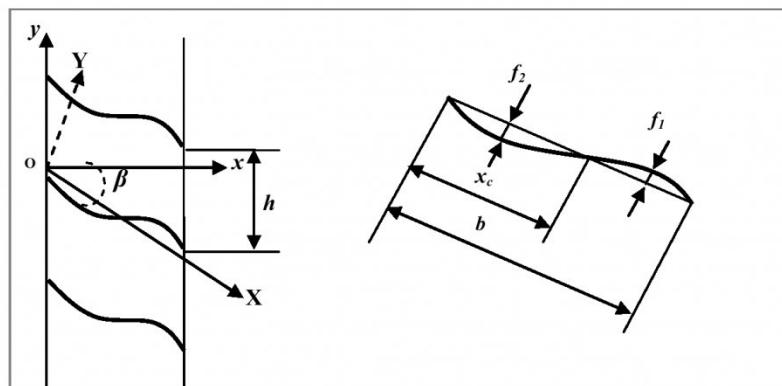


Рис. 2 Схема решетки слабоизогнутых S-образных профилей

где  $E_1(x), E_4(x)$  – полиномы 2-й и 4-й степеней,  $E_2(x), E_3(x)$  – синусоида и косинусоида соответственно.

Основными аэродинамическими характеристиками решеток являются коэффициенты аэrodинамических сил, действующих на профили решетки:  $C_x$  – коэффициент профильного сопротивления,  $C_y$  – коэффициент подъемной силы.

На рис. 3 приведены результаты расчета аэrodинамических характеристик решетки тонких S-образных профилей методом, предложенным в [5].

Из результатов расчета, представленных на рис.3, видно, что при малых значениях  $\varepsilon$  влиянием отрыва на аэродинамические характеристики решетки тонких S-образных профилей можно пренебречь. Однако значение  $\varepsilon$ , при котором влиянием отрыва можно пренебречь меньше того же значения при обтекании дугообразных профилей, рассмотренных в работе [5].

Кроме влияния отрыва на величину коэффициентов аэродинамических сил, практический интерес представляет влияние отрыва потока на КПД решетки  $\eta$ , потери которого определяются по формуле [5]:

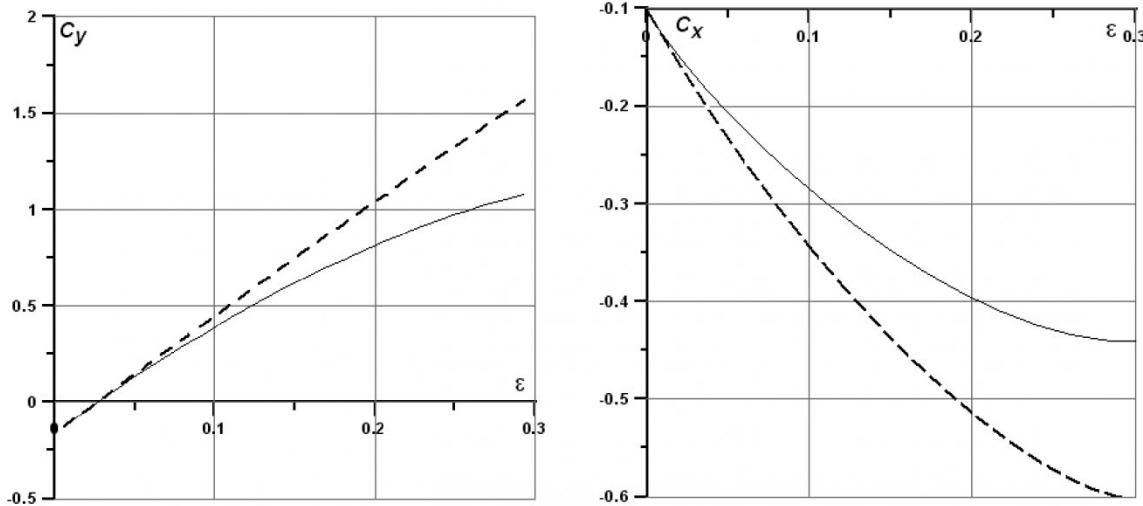


Рис. 3 Расчетные зависимости коэффициентов аэродинамических сил от  $\varepsilon=\alpha-\alpha_0$  при  $\beta=30^\circ$ . Штриховые линии – зависимости без учета отрыва

$$\Delta\eta = \frac{2A_0^2}{h\cos\alpha} \left[ \sin(\theta_0 - \alpha) \operatorname{sign}\varepsilon + \frac{\pi}{4} \cos(\theta_0 - \alpha) \right]$$

где  $\theta_0$  – угол между касательной к линии тока основного потока и осью  $x$ ,  $A_0 = O(\varepsilon)$  – коэффициент при особенности функции интенсивности вихревых слоев.

Как видно из рис.4, зависимость величины  $\Delta\eta$  от угла  $\varepsilon=\alpha-\alpha_0$ , характеризующая уменьшение КПД решетки, носит квадратичный характер. При этом величиной  $\Delta\eta$  во всем диапазоне  $\varepsilon$  нельзя пренебрегать.

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору Петрову Н.Н. и д.ф.-м.н., профессору Курзину В.Б. за помощь в работе.

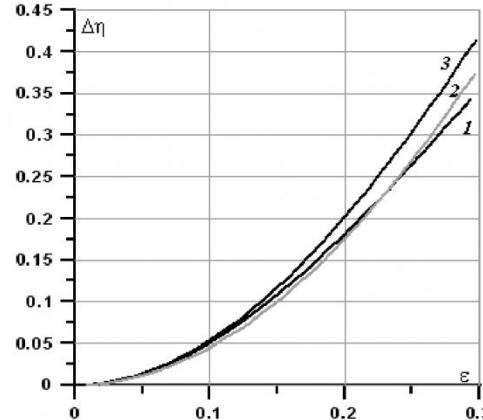


Рис.4 Влияние отклонения вектора скорости от угла безударного входа на КПД решетки при  $\beta=15, 30, 45^\circ$  (1-3)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брусиловский И. В. Аэродинамика и акустика осевых вентиляторов// Труды ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского, 2004. –Вып. 2650.-267с.
2. Белоцерковский С. М., Либанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. – М.: Наука, 1985. – 253 с.
3. Петров Н.Н. Теория и проектирование реверсивных осевых вентиляторов с поворотными на ходу лопатками рабочего колеса / Петров Н.Н., Попов Н.А., Батяев Е.А., Новиков В.А. // ФТПРПИ, 1999. - № 5. -С. 79-92
4. Грехнёва Е.Ю. Методы проектирования и расчета лопаточных систем осевых вентиляторов/ Е.Ю. Грехнёва, Н.Н. Петров // Труды конференции с участием иностранных ученых "Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды" (28 июня-2 июля 2010 г.). – Т. III. Машиноведение. – С. 292-297.
5. Курзин В.Б. Аэродинамические характеристики решетки тонких профилей, обтекаемой идеальной несжимаемой жидкостью с отрывом потока с передних кромок / В.Б. Курзин, В.А. Юдин // Механика жидкости и газа, 2009. – №2.. – С. 6-17

□ Автор статьи:

Грехнёва  
Елена Юрьевна,  
аспирант лаборатории рудничной  
аэродинамики (Институт горного дела  
СО РАН), тел. (3832) 170143;  
e-mail: [vau@ngs.ru](mailto:vau@ngs.ru)