

На правах рукописи

МОСКОВКО Юрий Георгиевич

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ
С ПРОФИЛЯМИ ЛОПАТОК СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ**

Специальность: 05.04.06 - Вакуумная, компрессорная техника и
пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург- 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Галеркин Юрий Борисович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Сухомлинов Игорь Яковлевич

Кандидат технических наук
Прокофьев Алексей Юрьевич

Ведущая организация: ЗАО «РЭП ХОЛДИНГ»

Защита состоится 29 ноября 2011 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, в ауд. 225 главного здания.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «___» октября 2011г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.09
доктор технических наук, профессор



Хрусталеv Б.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Осевые вентиляторы являются неотъемлемой частью энергетических, транспортных и технологических установок. Основным требованием к разрабатываемым вентиляторам является высокая эффективность как на расчетном режиме, так и в широком диапазоне производительности. Существующий метод проектирования осевых вентиляторов, разработанный И.В. Брусиловским, предполагает использование стандартных профилей, имеющих среднюю линию в виде дужки окружности. Метод был апробирован на множестве осевых вентиляторов и показал высокую точность получения расчетного режима, при этом полный КПД вентиляторов может достигать 0,86...0,9. Однако при проектировании осевых вентиляторов наряду с получением высокого КПД на расчетном режиме, могут выдвигаться и дополнительные требования: обеспечение эффективной работы в широком диапазоне режимов, значений углов установки лопаток колеса, 100% реверсирование потока изменением направления вращения колеса без изменения положения лопаток колеса и т.д. Широко используемые в вентиляторах стандартные профили типа NASA-65, NASA-500, DC-10, C-4 не обеспечивают специфических требований к вентиляторам. Поэтому разработка новых классов профилей и метода профилирования является актуальной задачей, особенно в связи с современными требованиями повышения энергоэффективности оборудования. **Объектом** диссертационного исследования являются осевые вентиляторы, в том числе и реверсивные.

Предметом исследования являются разработка новых классов профилей и создание методики профилирования лопаточных венцов с нестандартными профилями.

Цель диссертационной работы:

1. Разработка методики профилирования осевых вентиляторов с целью возможности использования профилей произвольной формы.
2. Поиск оптимальной формы профилей обеспечивающих:
 - эффективную работу вентиляторов в широком диапазоне углов установки лопаток колеса;
 - эффективную работу осевых вентиляторов при прямой и реверсивной работе

и возможность управления реверсивными свойствами вентиляторов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- а) усовершенствован метод и разработана программа профилирования лопаточных венцов осевых вентиляторов с профилями произвольной формы;
- б) разработана универсальная формула для описания средней линии профилей, которая дает возможность применять единый метод профилирования лопаточных венцов с профилями традиционной и произвольной формы;
- в) предложены профили с увеличенной нагрузкой в районе выходной кромки, применение которых приводит к увеличению диапазона эффективной работы осевого вентилятора;
- г) предложен новый класс реверсивных профилей с несимметричной S-образной формой средней линии, применение которых приводит к увеличению эффективности работы осевого вентилятора, как при нормальном, так и реверсивном режимах и дает возможность управления степенью реверсивности вентилятора за счет соответствующей установки лопаток колеса.

Практическая значимость

1. Разработанная методика может быть использована для профилирования лопаточных венцов осевых вентиляторов с профилями произвольной формы.
2. Предложенные профили с увеличенной нагрузкой в районе выходной кромки могут быть использованы для разработки высокоэффективных осевых вентиляторов с широким диапазоном эффективной работы.
3. Новый класс несимметричных S-образных профилей и рекомендации по их применению при профилировании могут быть использованы для разработки высокоэффективных осевых реверсивных вентиляторов с управляемыми реверсивными свойствами.

Основные научные результаты диссертационного исследования,
выносимые на защиту.

1. Методика профилирования лопаточных венцов с любыми, в том числе и нестандартными профилями, основанная на методе дискретных вихрей (МДВ), позволяющая получать рабочий режим вентилятора с высокой точностью.

2. Универсальная формула для описания средней линии профилей, которая дает возможность применять единый метод профилирования лопаточных венцов с профилями традиционной и произвольной формы.
3. Результаты численного моделирования обтекания плоских решеток, состоящих из профилей с различным положением аэродинамической нагрузки по хорде, обтекаемых вязким потоком при наличии отрывов, положение которых определяется при совместном использовании метода дискретных вихрей и численного расчета пограничного слоя.
4. Результаты аэродинамических исследований осевого вентилятора с лопатками, имеющими профили с увеличенной аэродинамической нагрузкой в районе задней кромки, и сравнение с вентилятором со стандартными профилями.
5. Новый класс реверсивных профилей с несимметричной S-образной формой средней линии, особенностью которых является возможность управления реверсивными свойствами вентилятора за счет соответствующей установки лопаток колеса.
6. Результаты аэродинамических исследований осевого реверсивного вентилятора с лопатками, имеющими несимметричные S-образные профили, и его сравнение с реверсивным вентилятором с профилями, имеющими уменьшенную кривизну профилей.

Достоверность и обоснованность результатов:

- а) обоснованность численного метода дискретных вихрей подтверждена методическими и теоретическими фундаментальными исследованиями, проведенными представителями научной школы С.М.Белоцерковского;
- б) достоверность разработанной методики профилирования осевых вентиляторов с лопатками, имеющими профили произвольной формы, подтверждена путем сравнения результатов расчета с данными, полученными экспериментально на моделях вентиляторов;
- г) достоверность представленных экспериментальных данных вытекает из апробированных методик испытаний согласно соответствующему ГОСТу, а также сертифицированным стендам, на которых эти испытания проводились.

Апробация результатов работы. Представленные в диссертации результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований докладывались

на: семинаре «Современное оборудование вентиляционных систем» (Москва, МДНТП, 1990); X международной научно-технической конференции по компрессорной технике, Казань, 1995; представлены в материалах: 5th International Conference on Air Distribution in Rooms. Yokohama, JAPAN, July 17-19, 1996; а также Proceedings of the 3th international symposium of experimental and computational aerothermodynamics of internal flows. –Beijing, China. – 1996.

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в 7 работах, в том числе в 3 статьях перечня изданий, рекомендованного ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем основной части составляет 134 страницы, библиография включает 96 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены: цели диссертационной работы, актуальность, практическая ценность полученных результатов, научная новизна, обоснованность и достоверность представленных результатов, приводится список опубликованных работ автора и формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается краткая история развития методов проектирования осевых вентиляторов, проводится обзор современных работ по теме исследования.

Во второй главе излагается теория осевых вентиляторов в ее классической постановке, опубликованной в работах И.В.Брусиловского. Исходными для расчета лопаточной системы вентилятора являются полное давление p_v и производительность вентилятора Q . На первом этапе выбираются: диаметр, частота вращения вентилятора и определяются безразмерные параметры: расчетный коэффициент теоретического давления ψ_{T_p} , коэффициент осевой скорости φ_{a_p} , относительный диаметр втулки V и проверяются условия безотрывного течения в привтулочных и периферийных областях. На втором этапе производится расчет течения в межвенцовых зазорах. На третьем этапе производится профилирование, то есть определение

в каждом расчетном сечении геометрии плоской решетки профилей, обеспечивающей при заданных значениях угла входа потока β_1 , густоты τ и угла атаки α_1 необходимый угол выхода потока или коэффициент силы Жуковского $c_{ж}$. В существующем методе профилирования используются теоретические характеристики решеток профилей, близких к профилю С-4, полученные методом конформного отображения.

В третьей главе излагается метод расчета характеристик решеток профилей при потенциальном отекании невязкой несжимаемой жидкостью. Используется метод дискретных вихрей, при котором N дискретных вихрей располагаются непосредственно на поверхности профилей решетки (рис.1).

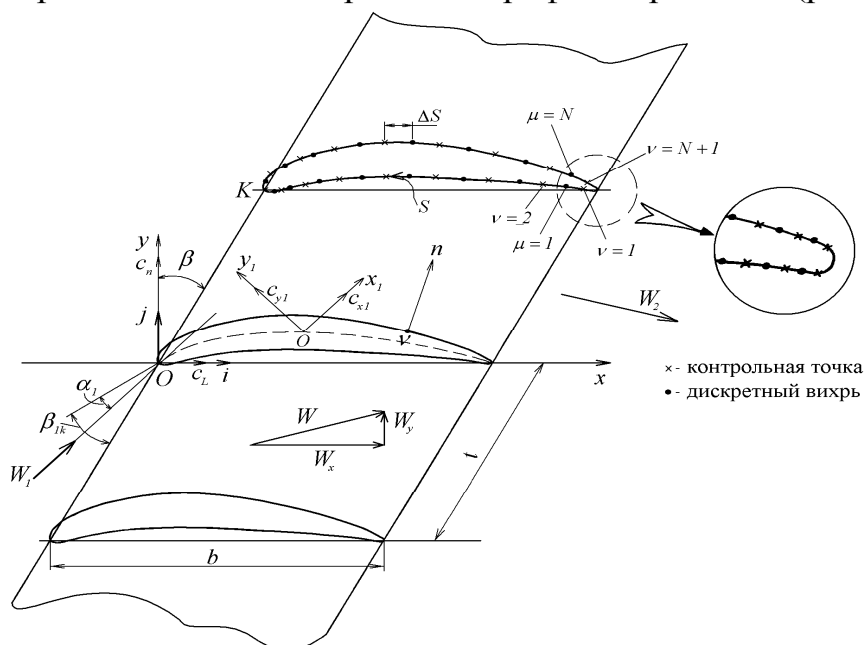


Рис. 1. Распределение дискретных вихрей на профилях решетки

Расположенные соответственным образом дискретные вихри на других профилях решетки образуют бесконечные цепочки вихрей. Между дискретными вихрями располагаются контрольные точки, в которых выполняется граничное условие о непротекании поверхности профиля:

$$\vec{W} \cdot \vec{n} = 0. \quad (1)$$

Скорость потока в любой точке плоскости течения представляет собой сумму скорости набегающего потока W_1 и скорости W' , индуцируемой вихревыми цепочками:

$$\vec{W} = \vec{W}_1 + \vec{W}'.$$

Компоненты скорости, индуцируемые вихревыми цепочками,

определяются по формуле Био-Саварра через циркуляции составляющих их вихрей, далее записывается граничное условие (2) в контрольных точках, расположенных на поверхности профиля, в результате определение циркуляций Γ_μ дискретных вихрей цепочек сводится к решению следующей системы линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{\mu=1}^N \Gamma_\mu [w_{x\mu\nu} \cos(n, x)_\nu + w_{y\mu\nu} \cos(n, y)_\nu] = -W_{1x} \cos(n, x)_\nu - W_{1y} \cos(n, y)_\nu$$

$$\nu = 1, 2, \dots, N + 1$$

Безразмерные компоненты скорости потока в любой точке плоскости течения определяются по формулам

$$W_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \sin(\beta_{1k} + \beta - \alpha_1) + \sum_{\mu=1}^N \bar{\Gamma}_\mu w_{x\mu}$$

$$W_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \cos(\beta_{1k} + \beta - \alpha_1) + \sum_{\mu=1}^N \bar{\Gamma}_\mu w_{y\mu}$$

Рассчитав компоненты скорости, можно построить поле скоростей в окрестности решетки, рассчитать давление на контуре профиля, определить действующие на него аэродинамические силы, а также значение среднего угла выхода из решетки и другие параметры. В этой же главе впервые формулируется методика и алгоритм профилирования лопаточных венцов с использованием МДВ, который состоит в следующем. Определяется множество решеток профилей, имеющих различные прогиб \bar{f} и углы установки θ_Γ , обеспечивающих при заданном значении густоты τ необходимое значение коэффициента подъемной силы C_{y1}^* . Задаются начальные значения \bar{f} и θ_Γ . Для поиска используется итерационный процесс, который для $i+1$ -го приближения записывается:

$$\Delta \theta_{\Gamma i+1} = \theta_{\Gamma i} + \frac{dC_{y1}^* - C_{y1}}{\left(\frac{dC_{y1}}{d\theta_\Gamma}\right)_i}, \quad (2)$$

где $i=1, 2, \dots, M$ номер итерации.

Процесс вычисления по формуле (3) прекращается при выполнении

условия $\theta_{\Gamma_{i+1}} - \theta_{\Gamma_i} \leq \varepsilon$, где ε - заданная точность определения угла установки.

Из полученного множества решеток профилей определяется решетка, имеющая заданный угол атаки α_1 . Геометрические параметры искомой решетки θ_{Γ} и \bar{f} определяются из совместного решения уравнения, записанного по условию входа, и уравнения, аппроксимирующего полученное множество значений $\theta_{\Gamma_j} = f(\bar{f}_j)$,

$$\begin{cases} \theta_{\Gamma}(\bar{f}) = \beta_1 + \alpha_1 + \mathcal{G}(\bar{f}); \\ \theta_{\Gamma}(\bar{f}) = a_j + b_j(\bar{f} - \bar{f}_j) + c_j(\bar{f} - \bar{f}_j)^2 + d_j(\bar{f} - \bar{f}_j)^3. \end{cases} \quad (3)$$

$j=1,2,\dots,N$, где N - число значений \bar{f} , для которых получены значения θ_{Γ} , $0 \leq \bar{f} \leq 0,15$.

Полученные из решения системы уравнений (3) значения θ_{Γ} и \bar{f} определяют решетку профилей, обеспечивающую при данном τ расчетные значения C_{y1}^* при заданном угле атаки α_1 . Совокупность значений θ_{Γ} , \bar{c} и \bar{f} , полученных в разных расчетных сечениях по высоте лопатки образуют поверхность лопатки.

В четвертой главе приведены результаты расчетно-теоретического исследования влияния формы профилей на суммарные характеристики плоских решеток. Предложена универсальная формула для средней линии профиля (рис.2):

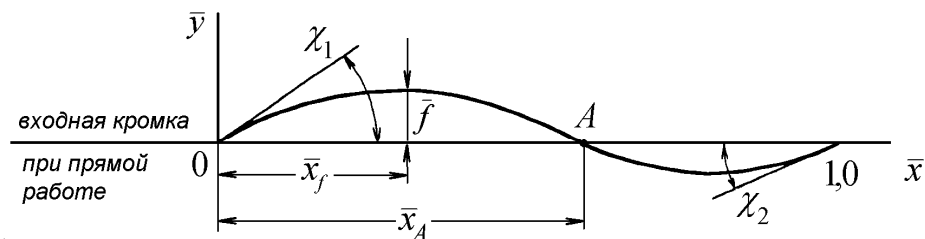


Рис. 2. Средняя линия профиля

а) на участке $0 \leq \bar{x} \leq \bar{x}_f$, $\bar{y}_{вх}(\bar{x}) = \bar{x} \cdot \operatorname{tg} \chi_1 - A \bar{x}^n$;

б) $\bar{x}_f \leq \bar{x} \leq 1,0$: $\bar{y}_{вых}(\bar{x}) = \frac{\bar{f}}{(1 + |\cos k\pi|)} \left\{ \cos \frac{k\pi(\bar{x} - \bar{x}_f)}{(1 - \bar{x}_f)} + |\cos k\pi| \right\}$.

Здесь χ_1 - конструктивный угол входа, а χ_2 - конструктивный угол выхода.

Параметры n и A определяются из уравнений:

$$n = \frac{1}{1 - \frac{\bar{f}}{\bar{x}_f \cdot \operatorname{tg} \chi_1}}; \quad A = \frac{\operatorname{tg} \chi_1}{n \cdot \bar{x}_f^{n-1}}.$$

Для средней линии профиля на начальном участке, близком к дуге окружности, угол $\chi_1 = 2 \operatorname{arctg}(\bar{f} / \bar{x}_f)$. Коэффициент k определяет кривизну средней линии профиля в районе задней кромки и его значение может изменяться в пределах $k = 0,5 \dots 1,5$. Так, при $0,5 \leq k < 1$ средняя линия профиля в районе задней кромки имеет перегиб в точке А (S-образная средняя линия). При $k = 1,0$ угол $\chi_2 = 0^\circ$, а при $k > 1$ угол $\chi_2 < 0^\circ$ (S-образные реверсивные профили).

На параметры: $\psi_T = 0,43$, $\varphi_a = 0,5$ и $\nu = 0,5$ (вентилятор ОВ-247М) по разработанной методике был спрофилирован ряд решеток профилей, отличающихся формой средней линии, положением максимального прогиба \bar{x}_f и максимальной толщины \bar{x}_c . Профили №1-3 имели среднюю линию — дугу окружности ($\bar{x}_f = 0,5$) и различное положение максимальной толщины $\bar{x}_c = 0,3-0,6$ (профиль №1 является стандартным). Профиль №4 имел аэродинамически нагруженную переднюю часть ($\bar{x}_f = 0,3$, $k = 0,75$), а профиль №6 нагруженную заднюю кромку ($\bar{x}_f = 0,75$, $k = 0,75$). Профиль №5 занимал промежуточное положение ($\bar{x}_f = 0,5$, $k = 0,75$).

Численные исследования проводились по программе расчета нестационарного отрывного двухмерного обтекания решеток профилей (Котовский В.Н., Ништ М.И., Федоров Р.М.). Использован подход, основанный на сочетании модели идеальной жидкости для тела конечной толщины в основной части течения с теорией пограничного слоя в области, непосредственно примыкающей к поверхности тела. Задача решалась в нестационарной постановке: из состояния покоя жидкость начинает натекает

на решетку с заданным полем скоростей (обычно это равномерный поток с заданным углом входа в решетку). По мере развития течения вокруг профиля формируется пограничный слой, образуются точки отрыва потока и вихревые пелены, сходящиеся с профиля (рис.3).

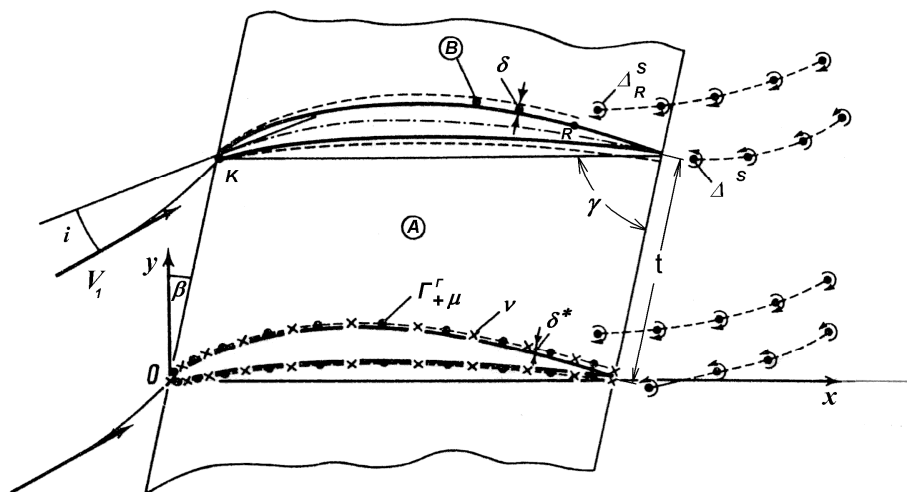


Рис. 3. Расчетная схема течения в решетке профилей

Количество возможных точек отрыва и их месторасположение на профиле находилось в процессе расчета. Расчеты производились до момента времени, пока положение точек отрыва пограничного слоя не стабилизировалось. В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости углов поворота потока в решетке $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ (β_1 и β_2 - углы между вектором скорости на входе и выходе из решетки и фронтальной линией решетки) и коэффициентов профильных потерь ζ в зависимости от угла входа потока β_1 на решетку профилей №1,2,3. Как видно, профили с отнесенным к задней кромке положением максимальной толщины ($\bar{x}_c = 0,5$ и $0,6$) по сравнению со стандартным профилем имеют меньше угол поворота и на 10% больше коэффициент профильных потерь. Характеристики решеток профилей № 4, 5, 6 приведены на рис. 5. Худшие характеристики имеет решетка №4 ($\bar{x}_f = 0,3$), а наилучшие характеристики имеет решетка профилей №6 ($\bar{x}_f = 0,75$). Сравнение распределения давлений по контуру профилей №4,5 и 6 показало, что профиль №6 имеет минимальный градиент давления на верхней поверхности и максимально сдвинутую к задней кромке точку отрыва пограничного слоя, но на верхней поверхности имеется локальная зона с местным ускорением потока. Для корректировки эпюры давления профиля

спрофилированы решетки профилей № 7,8 и 10 с $\bar{x}_f = 0,65$ ($k = 0,5$) и с различными расчетными углами атаки.

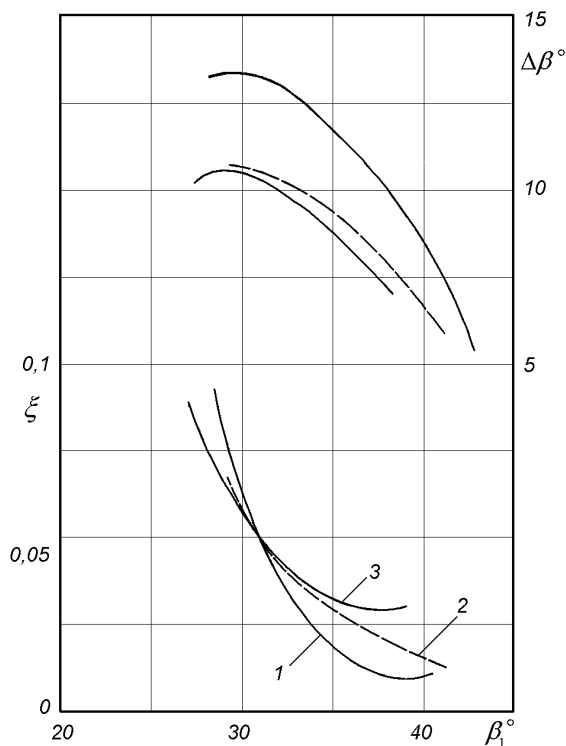


Рис. 4. Характеристики решеток профилей №1,2 и 3

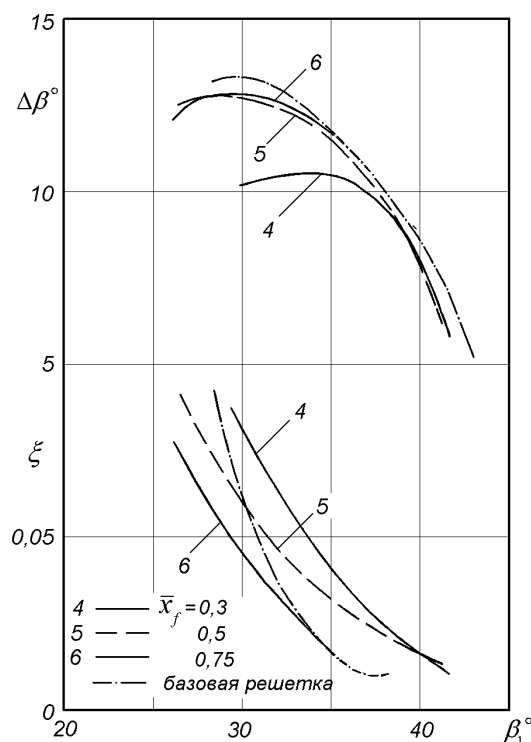


Рис. 5. Характеристики решеток профилей №4, 5 и 6

Все решетки, за исключением решетки № 8 с расчетным углом атаки $\alpha_{1p} = -4^\circ$, на расчетном угле входа потока имели меньше профильные потери, чем базовая. Следовательно, для рассматриваемых решеток смещение максимального прогиба к задней кромке приводит к некоторому уменьшению профильных потерь, по сравнению с решетками со стандартными профилями.

В пятой главе приводится подробное описание экспериментальных стендов, на которых проводились испытания моделей осевых вентиляторов. Даются методика проведения испытаний и формулы для обработки результатов измерений. Приводятся погрешности измерений параметров аэродинамических характеристик моделей вентиляторов.

В шестой главе представлены результаты исследований осевых вентиляторов с лопатками, имеющими профили с увеличенной аэродинамической нагрузкой в районе задней кромки. На одни и те же расчетные параметры: $\psi_T = 0,43$, $\varphi_a = 0,5$ и $\nu = 0,5$ с были разработаны два

вентилятора схемы К+СА. Вентилятор ОВ-247М имел лопадки колеса со стандартными профилями, а вентилятор ОВ-247S - лопадки с профилями с увеличенной аэродинамической нагрузкой в зоне задней кромки ($\bar{x}_f = 0,65$). Профилирование лопаточных систем было выполнено по разработанной методике. Вентиляторы имели диаметр 700мм и один и тот же спрямляющий аппарат.

На расчетных углах установки лопаток колеса было получено, что экспериментальное значение коэффициента теоретического давления вентилятора ОВ-247М больше расчетного на 4,6%, а вентилятора ОВ-247S больше на 1,9%. Такая точность получения расчетных параметров является достаточно высокой и свидетельствует о высоком качестве разработанной методики профилирования лопаточных венцов. Аэродинамические характеристики вентиляторов при различных углах установки лопаток колеса приведены на рис.6, а на рис.7 приведено сравнение зон полных КПД двух вентиляторов.

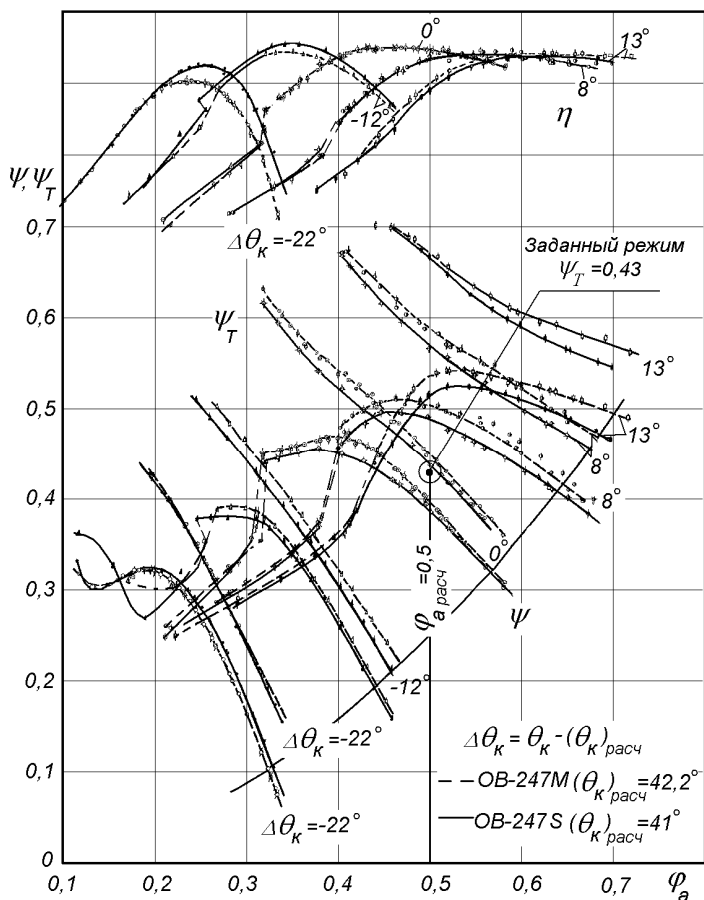


Рис. 6. Аэродинамические характеристики вентиляторов ОВ-247М и ОВ-247S

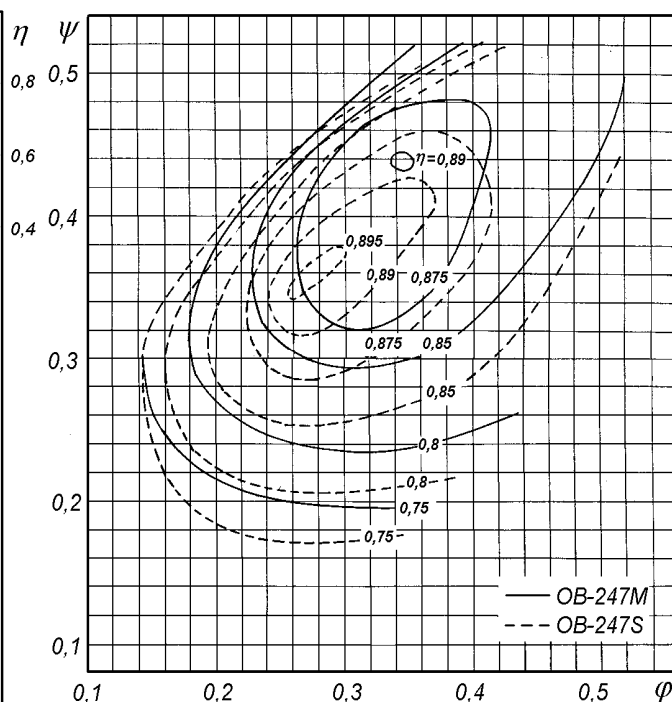


Рис. 7. Сравнение полных КПД вентиляторов ОВ-247М и ОВ-247S

Вентилятор ОВ-247S с модифицированными профилями имеет выигрыш в КПД на меньших углах установки лопаток колеса, так, при углах установки $\theta_k = 21^\circ 20' (20^\circ)$ (режим, где кривые теоретического давления $\psi_T(\varphi_a)$ вентиляторов совпадают), максимальный полный КПД вентилятора ОВ-247S выше на 6%, чем у вентилятора ОВ-247М. Анализ результатов испытаний позволяет сделать следующие выводы:

- на расчетном угле установки лопаток колеса применение профилей с увеличенной нагрузкой в районе выходной кромки приводит к более равномерному распределению профиля осевой составляющей скорости по радиусу;
- положительный эффект от применения этих профилей возрастает с уменьшением углов установки лопаток колеса;
- вентилятор с колесом, имеющим лопатки с такими профилями, имеет увеличенный диапазон эффективной работы.

Седьмая глава посвящена исследованию реверсивных вентиляторов с лопатками, имеющими профили S-образной формы. Предложены несимметричные S-образные профили, у которых входная часть (от входной кромки до точки перегиба) имеет большую протяженность и больший прогиб, чем выходная часть профиля (от точки перегиба до выходной кромки). При использовании лопаток с такими профилями за счет различной установки лопаток были получены вентиляторы с различными реверсивными свойствами при сохранении высокой эффективности как при нормальном, так и при реверсивном режимах работы.

Для исследования аэродинамических свойств несимметричных S-образных профилей был разработан вентилятор ОВ-268S схемы К с параметрами: $\psi_T = 0,185$; $\psi = 0,14$; $\varphi = 0,363$; $\varphi_a = 0,405$; $\nu = 0,35$. Лопатки вентилятора имели S-образные несимметричные профили с параметрами: $\bar{x}_f = 0,3$ и $k = 1,25$, с расчетными углами атаки: у корня $+5^\circ$, а на периферии 0° . На эти же параметры был спроектирован осевой вентилятор ОВ-268, имеющий лопатки с обычными профилями (средняя линия – дуга окружности, $\bar{x}_f = 0,5$), но с уменьшенным изгибом: углы атаки у корня: $+25^\circ$ и на

периферии $+7^\circ$. В обоих вентиляторах использованы тонкие профили, близкие к листовым. Профилирование лопаточных систем было выполнено по разработанной методике. Вентиляторы имели диаметр 700мм.

На расчетных углах установки лопаток колеса было получено, что экспериментальное значение коэффициента теоретического давления вентилятора ОВ-268 на 2,7% больше расчетного, а вентилятора ОВ-268S на 2% меньше расчетного, что свидетельствует о высокой точности разработанной методики профилирования. Были проведены обширные аэродинамические исследования этих вентиляторов. Аэродинамические характеристики вентилятора ОВ-268S с нормально установленными лопатками и с «симметричным» колесом ОВ-268S-С (лопатки поочередно установлены в нормальном и перевернутом положении) приведены на рис.8.

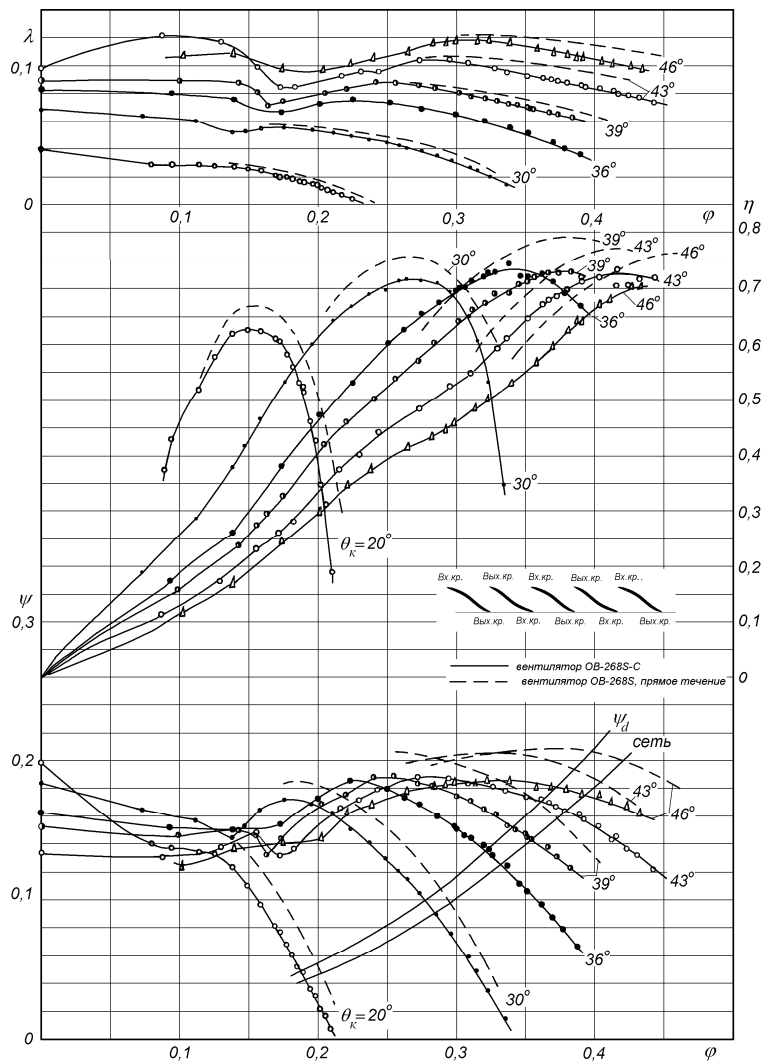


Рис. 8. Аэродинамические характеристики вентиляторов ОВ-268S-С и ОВ-268S

Максимальный полный КПД вентилятора ОВ-268S-C при нормальном и реверсивном режимах достигает $\eta_{max}=0,74$, что на 7,5% меньше, чем у вентилятора ОВ-268S при нормальном режиме течения. Однако степень реверсивности вентилятора ОВ-268S-C на всех режимах равна $R=100\%$, а производительность составляет 95% от производительности вентилятора ОВ-268S при нормальном течении.

Если рассматривать параметры вентиляторов в сети, проходящей через расчетный режим, то при нормальном положении лопаток оба вентилятора имеют одинаковую степень реверсивности $R=92\%$, но при нормальном режиме полный КПД вентилятора ОВ-268S на 3,4%, а при реверсивном на 8,5% больше КПД, чем у вентилятора ОВ-268. Разница в эффективности более значительная при сравнении вентиляторов с симметричными колесами. Так, вентилятор ОВ-268S-C имеет на 13% больше КПД при реверсивном режиме.

Параметры вентилятора ОВ-268S, полученные при нормальной и симметричной установке лопаток, являются крайними случаями. При иных вариантах установки лопаток с несимметричными S-образными профилями может быть получена различная степень реверсивности в диапазоне от 92 до 100%. При этом максимальный полный КПД вентилятора при нормальном режиме будет лежать в диапазоне 0,795...0,715, а при реверсивном режиме в диапазоне 0,71...0,74.

Восьмая глава иллюстрирует внедрение полученных результатов. В главе приведены аэродинамические схемы и характеристики выпускаемых промышленностью вентиляторов, разработанных диссертантом по заданиям различных отечественных и зарубежных фирм.

Завершается диссертация Заключением, списком цитированной Литературы, а также Приложением.

Заключение и выводы

1. Усовершенствован метод и разработана программа профилирования лопаточных венцов осевых вентиляторов с профилями произвольной формы. Аэродинамические испытания вентиляторов, рассчитанных с помощью данного метода, подтвердили его высокую точность: экспериментальное значение коэффициента теоретического давления укладывается в диапазоне $\pm 4\%$ от расчетного значения.

2. Разработана универсальная формула для описания средней линии профилей, которая дает возможность применять единый метод профилирования лопаточных венцов с профилями традиционной и произвольной формы.
3. В результате численного моделирования вязкого отрывного течения в плоских решетках профилей, отличающихся различным распределением аэродинамической нагрузки по хорде, было определено, что минимальные потери имеют профили с увеличенной аэродинамической нагрузкой в районе задней кромки.
4. На примере высоконагруженного осевого вентилятора с лопатками колеса, имеющими профили с увеличенной аэродинамической нагрузкой в районе задней кромки, была подтверждена эффективность такого типа профилей. Вентилятор имеет более широкую область эффективной работы, чем вентилятор со стандартными профилями.
5. Для лопаток осевых реверсивных вентиляторов предложен новый класс профилей с несимметричной S-образной формой средней линии, особенностью которых является возможность управления реверсивными свойствами вентилятора за счет соответствующей установки лопаток колеса.
6. Использование профилей этого класса позволяет обеспечить высокую степень реверсивности вентиляторов только за счет изменения направления вращения колеса без перестановки лопаток колеса.
7. Аэродинамические испытания осевого реверсивного вентилятора показали что вентилятор с лопатками, имеющими несимметричные S-образные профили имеет больше КПД как при нормальном, так и при реверсивном режимах работы, по сравнению с вентилятором, имеющим лопатки со стандартными профилями.
8. Представлены схемы и аэродинамические характеристики высокоэффективных вентиляторов с лопатками специальной формы, разработанных с использованием предложенной методики и серийно выпускаемых отечественными предприятиями и зарубежными фирмами.

Список литературы

1. Московко Ю.Г. Разработка и исследование аэродинамических схем реверсивных регулируемых осевых вентиляторов// Промышленная

- Аэродинамика. – М.: Машиностроение, 1991. –Вып. 36. –С.240-250.
2. Брусиловский И.В., Вермель В.Д, Митрофович В.В., Московко Ю.Г. Система автоматизированной разработки осевого вентилятора// Химическое и нефтяное машиностроение. –1992. –№3. – С.8-9.
 3. Котовский В.Н., Московко Ю.Г. Применение нестандартных профилей для увеличения эффективности осевых вентиляторов// Компрессорная техника и пневматика.–2010.–№ 8.–С.9–13.
 4. Московко Ю.Г. Использование несимметричных S-образных профилей в осевых реверсивных вентиляторах// Компрессорная техника и пневматика.–2011.–№ 3. –С.240-250
 5. Брусиловский И.В., Московко Ю.Г., Попова Л.И. Опыт использования нетрадиционных профилей для повышения эффективности осевых вентиляторов при малых углах установки лопаток колеса// Материалы докладов X международной научно-технической конференции по компрессорной технике. –Казань, 1995. – С.216-217.
 6. Y.Moscovko, L.Popova, J.Brussilovski, V.Mitrofovich. Method of aerodynamic design of axial fans// Proceedings of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms. Yokohama, JAPAN, July 17-19, 1996.
 7. Y.Moscovko, L.Popova, J.Brussilovski, V.Mitrofovich. Method of aerodynamic design of axial fans// Proceedings of the 3th international symposium of experimental and computational aerothermodynamics of internal flows. –Beijing, China. – 1996.