

В.Н. Макаров, С.В. Белов, О.В. Горшков

**МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА КОНФОРМНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО
РАСЧЕТА ВРАЩАЮЩИХСЯ КРУГОВЫХ РЕШЕТОК
С S-ОБРАЗНЫМИ ПРОФИЛЯМИ**

Семинар № 20

Шахтные центробежные вентиляторы, в которых использованы круговые решетки с профилями S-образной формы, отличаются повышенным значением коэффициента давления при сохранении высоких значений КПД. Межлопаточный канал рабочего колеса в этом случае можно представить состоящим из двух участков. На первом, основном по протяженности участке, происходит формирование потока и условий его взаимодействия с рабочими лопатками, при которых устраняется отрывное вихреобразование, при этом градиент давления в межлопаточном канале по его длине имеет наибольшее значение. На втором участке происходит существенный рост давления за счет большой кривизны канала, обеспечивающей существенный рост угла выхода потока из круговой решетки. При этом, поскольку поток застабилизирован на первом участке, а протяженность второго участка невелика, не успевает возникнуть интенсивное отрывное вихреобразование на выходе из рабочего колеса. Это способствует повышению аэродинамической нагруженности вентилятора при сохранении его экономичности. Данные аэродинамические схемы нашли широкое распространение в шахтном вентиляторо-

строении, однако до настоящего времени не разработан математический аппарат расчета их аэродинамических характеристик. По этой причине большой практический интерес представляет разработка математической модели для расчета исследования аэродинамики вращающейся круговой тандемной решетки кусочно-гладких профилей, образованных логарифмическими спиралью с различными углами раскрытия, с помощью которых можно формировать S-образные профили. На рис. 1 показана круговая решетка тандемных профилей и соответствующая ей окружность единичного радиуса [2, 3, 4, 5]. Тандемный профиль состоит из двух частей, образованных логарифмическими спиралью с углом раскрытия β_{l1} , β_{l2} , причем $\beta_{l2} > \beta_{l1}$, и установленных с зазором между ними. Зазор между лопатками спрофилирован таким образом, что при выходе из него потока формируется вихреисточник.

Для построения математического алгоритма аэродинамического расчета вращающейся тандемной круговой решетки профилей в виде логарифмических спиралей с переменным углом их раскрытия воспользуемся методом конформного отображения течения в круговой решетке на область, образованную двумя концентриче-

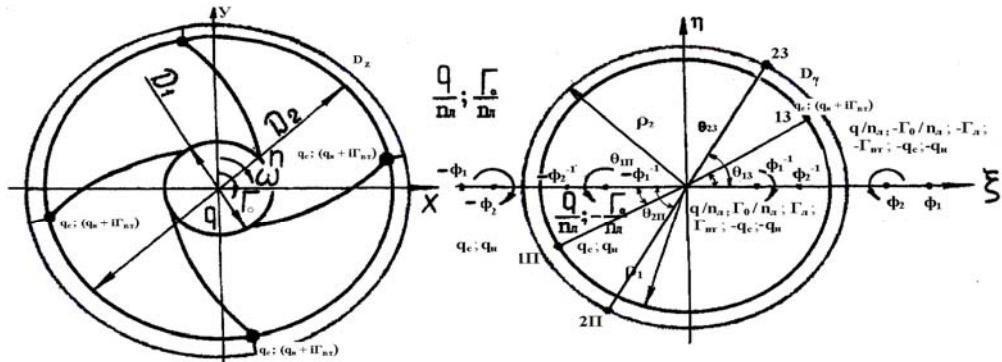


Рис. 1. Тандемная круговая решётка профилей в виде логарифмических спиралей с переменным углом их раскрытия и соответствующая ей окружность единичного радиуса

скими окружностями. В этом случае задача сводится к определению функции конформного отображения схематизированной тандемной круговой решетки профилей с особенностями в виде стока и вихреисточника четырехлистной римановой области D_z и на $2n_\alpha$ -листную римановую область D_γ , образованную двумя концентрическими окружностями и функции комплексного потенциала течения в области D_γ вне кольца с единичным внутренним радиусом.

Представим тандемную круговую решетку профилей из отрезков логарифмических спиралей в виде двух круговых решеток, следующих одна за другой. Воспользуемся принципом гидродинамической аналогии для потенциальных течений в областях D_z и D_γ . При соответствующих геометрических параметрах круговых решеток, функции, осуществляющие конформное отображение области D_γ на область D_z примут вид

$$z_1 = \sqrt[n_1]{\frac{(\gamma + \Phi_1)}{(\gamma - \Phi_1)}} \cdot \sqrt[n_1]{\frac{(\gamma + \Phi_1^{-1})}{(\gamma - \Phi_1^{-1})}},$$

$$z_2 = \sqrt[n_2]{\frac{(\gamma + \Phi_2)}{(\gamma - \Phi_2)}} \cdot \sqrt[n_2]{\frac{(\gamma + \Phi_2^{-1})}{(\gamma - \Phi_2^{-1})}}, \quad (1)$$

где $\bar{\rho} = \ln \rho$.

Полученные соотношения соответствуют уравнению, полученному в [3] при раздельном рассмотрении двух круговых решеток профилей, составляющих тандемную решетку и, с учетом того, что отображение проводится на кольцевую область D_γ . Внутренняя окружность кольца области D_γ , которой соответствует конформное отображение $z_1 (\gamma)$ области D_z , имеет $\rho = 1$, а внешняя окружность кольца области D_γ , которой соответствует функция конформного отображения $z_2 = (\gamma)$, имеет $\rho_2 > 1$.

Формпараметры Φ_1 и Φ_2 круговой тандемной решетки определяются из условия нарушения конформности в заданных критических точках

$$\frac{dz}{d\gamma} = 0 \text{ при } \gamma_1 = e^{i\theta_{13}}, \gamma_2 = \rho_2 e^{i\theta_{23}}.$$

Для построения функции комплексного потенциала течения в области D_γ с единичным радиусом внутренней окружности воспользуемся методом особых точек С.А.Чаплыгина и принципом суперпозиции.

Сложность задачи определения комплексного потенциала течения в данном случае заключается в установлении условий единственности полу-

чаемого решения при расчете циркуляции вокруг вращающейся круговой решетки профилей. Примем в качестве такого условия аналог принципа Жуковского-Чаплыгина-Кутта о сходе потока с задней критической точки аналитического профиля [1]. Учитывая принятую нами специфику структуры тандемной круговой решетки профилей, условие Жуковского-Чаплыгина-Кутта в данном случае можно трансформировать в три взаимосвязанных условия обеспечения полного торможения потока в трех точках тандемного профиля: в задней критической точке составляющей тандемного профиля, образующей первую ступень решетки, и в передней и задней критических точках составляющей профиля второй ступени тандемной решетки. Таким образом, получаем систему трех уравнений, однозначно определяющих циркуляцию потока вокруг тандемного профиля.

В соответствии общей теорией аэродинамического расчета вращающейся круговой решетки аналитических профилей со струйным управлением циркуляцией и математической моделью, изображенной на рис. 1, уравнение для коэффициента циркуляции вокруг профиля первой ступени вращающейся тандемной круговой решетки запишем в виде

$$\Gamma_{a1} = 4q \frac{[1 + n_a \bar{q}_\sigma (\Phi^2 - 1)^2 \cdot (\Phi^2 + 2\Phi \cos \theta_{13} + 1)^2] \Phi (\Phi^2 + 1) \sin \theta_{13}}{n_a \cdot (\Phi^2 - 1) \cdot (\Phi^2 + 2\Phi \cos \theta_{13} + 1)} - \frac{2\pi \bar{V}_{a1} (\Phi^2 - 2\Phi \cos \theta_{13} + 1)}{(\Phi^2 - 1)} - \frac{4\Gamma_0 \Phi \cos \theta_{13}}{n_a (\Phi^2 + 2\Phi \cos \theta_{13} + 1)} + \frac{\bar{q}_u \sin(\theta_{2n} - \theta_{13})}{[1 - \cos(\theta_{2n} - \theta_c)]} + \frac{\Phi q_\sigma \sin \theta_{2n}}{(\Phi^2 - 1) - \Gamma_{a1}}. \quad (2)$$

где $\bar{q}_\sigma = \frac{(q_c + q_u)}{q}$.

Уравнение для коэффициента циркуляции Γ_{bt} , обусловленной эффектом тандемности профиля вращающейся круговой решетки с переменной кривизной профилей, составляющих тандемную лопатку, определим из согласования условий Жуков-

ского-Чаплыгина-Кутта в точках θ_{13} и θ_{2n} на кольцевой области D_γ , соответствующих задней критической точке первого профиля и передней точке полного торможения потока второго профиля тандемной лопатки.

С учетом вышеизложенного получим выражение для коэффициента циркуляции Γ_{bt} в виде

$$\begin{aligned} \Gamma_{bt} = & -4q \frac{[1 + n_a \bar{q}_\sigma (\Phi^2 - 1)^2 (\Phi^2 + 2\Phi \cos \theta_{2n} + 1)^2]}{n_a (\Phi^2 - 1) (\Phi^2 + 2\Phi \cos \theta_{2n} + 1)} \times \\ & \times \Phi (\Phi^2 + 1) \sin \theta_{2n} - \\ & - \frac{2\pi \bar{V}_{a2n} (\Phi^2 - 2\Phi \cos \theta_{2n} + 1)}{(\Phi^2 - 1)} - \\ & - \frac{4\Gamma_0 \Phi \cos \theta_{2n}}{n_a (\Phi^2 + 2\Phi \cos \theta_{2n} + 1)} + \\ & + \frac{\bar{q}_u \sin(\theta_{2n} - \theta_{13})}{[1 - \cos(\theta_{2n} - \theta_c)]} + \frac{\Phi q_\sigma \sin \theta_{2n}}{(\Phi^2 - 1) - \Gamma_{a1}}. \end{aligned} \quad (3)$$

В соответствии с принятыми допущениями течение во второй ступени вращающейся тандемной круговой решетки профилей представляет собой в области D_2 безударное, безциркулярное потенциальное течение с линиями тока в виде логарифмической спирали с углом раскрытия β_{l2} , что будет соответствовать в $2n_l$ -листной области D_γ окружности радиуса r_2 , при этом $r_2 = D_2 / D_1$.

Сравнивая уравнения (2), (3) можно установить, что при потенциальном обтекании вращающейся тандемной круговой решетки профилей, с точки зрения гидродинамической аналогии, вторую ступень круговой решетки можно рассматривать как систему стабилизированных вихреисточников в окрестности выхода из первой ступени. При этом геометрические параметры второй ступени и профилированного щелевого зазора, при заданной геометрии первой ступени тандемной круговой решетки профилей, определяют интенсивность вихреисточника, при которой обеспечивается потенциальное ее об-

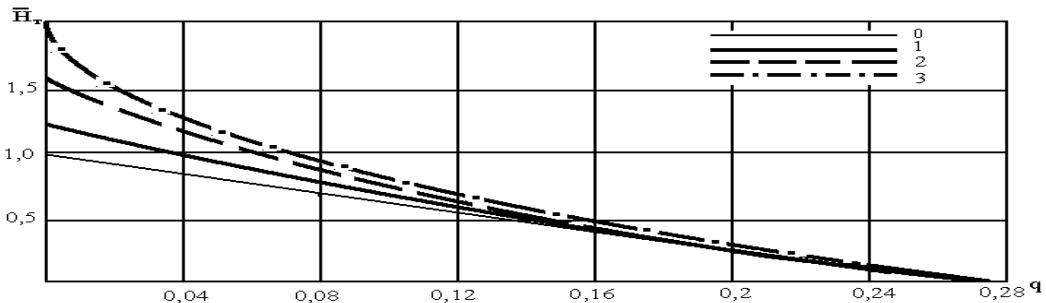


Рис.2. Удельная идеальная аэродинамическая характеристика вращающейся круговой решетки S-образных профилей: 1 – $\beta_{л1} = \beta_{л2} = 18^\circ$; 2 – $\beta_{л2} = 55^\circ$; 3 – $\beta_{л2} = 95^\circ$

текание. Интенсивность вихреисточника зависит от геометрических параметров профилированного щелевого канала и вихревой камеры, расположаемой в полости профиля второй ступени тандемной круговой решетки. Таким образом, используя известные принципы внутренней аэrodинамики вихревых каналов, можно произвести расчет геометрических параметров управляющего устройства, обеспечивающего потенциальное обтекание вращающейся круговой тандемной решетки профилей переменной кривизны [1].

Проведенные теоретические исследования подтверждают высокую эффективность применения круговых решеток с аэрогазодинамическими профилями S-образной формы. На рис.2 приведены идеальные аэродинамические характеристики вращающихся круговых тандемных решеток профилей с различными углами их раскрытия. Из анализа графиков видно, что максимальный коэффициент теоретического давления $H_{т_0}$ зависит от геометрических параметров первой и второй ступени тандемной круговой решетки профилей. Однако наибольшее влияние на него оказывает угол установки профиля $\beta_{л2}$ второй ступени. Следует заметить, что

величина коэффициента циркуляции $\Gamma_{вт}$ существенно возрастает при увеличении $\Delta\beta = \beta_{л2} - \beta_{л1}$, что при конструктивном исполнении управляющего устройства накладывает на него определенные ограничения. Заметим, что величина ρ_2 при потенциальном течении не влияет на коэффициент $H_{т_0}$ при прочих равных условиях.

Таким образом, приведенные результаты исследований являются теоретическим подтверждением эффективности предложенных Паком В.В. и Ковалевской В.И. и применяемых в настоящее время утолщенных профилей S-образной формы. Криволинейный выходной участок указанных профилей имеет малую протяженность, составляющую не более 3% от диаметра рабочего колеса, и определяется исключительно из условия минимума потерь энергии на отрывное вихреобразование на выходе из рабочего колеса вентилятора. Исходя из изложенных ранее особенностей течения потока в межлопаточном канале рабочего колеса с лопатками S-образной формы и с учетом полученных результатов теоретических исследований, оптимальный диапазон углов выхода профилей первой и второй ступеней тандемной круговой решетки профилей составляет: $\beta_{л1} = 20^\circ \div$

40° ; $\beta_{n2} = 80^\circ \div 125^\circ$, то есть угол со-
пряжения логарифмической спирали
 $\Delta\beta = 40^\circ \div 105^\circ$. Диаметр споряжения
S-образных профилей ограничен
геометрическими параметрами вихре-
вой камеры, которая должна быть
вписана в профиль второй ступени
тандемной круговой решетки. Заме-
тим, что на практике геометрические
параметры управляющего устройства
рассчитывают при максимальном зна-
чении H_t , то есть при $H_t = H_{t0}$, либо в
области оптимального режима работы
круговой решетки. По мере увеличе-
ния коэффициента расхода q проис-
ходит снижение H_t и соответственно,
снижаются энергетические параметры
управляющего устройства аэрогазо-

динамического профиля, что и отра-
жается на графике идеальной аэро-
динамической характеристики.

Следует подчеркнуть, что при $\beta_{n2} =$
 90° профиль второй ступени тан-
демной круговой решетки принимает
вид прямолинейной радиальной лопатки.

Таким образом, поведенные тео-
ретические исследования показыва-
ют высокую эффективность приме-
нения S-образных аэродинамиче-
ских профилей в tandemных круго-
вых решетках для разработки ради-
альных аэродинамических схем с
высокой аэродинамической нагру-
женностью, адаптивностью и эконо-
мичностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Н.Г. Прикладная газо-
вая динамика. – М.: Наука, 1976. – 888 с.
2. Гостелоу Д.Ж. Аэродинамика реше-
ток турбомашин. – М.: Мир, 1987. – 391 с.
3. Макаров В.Н. Модификация мето-
да конформного отображения для расчета
радиальной решетки профилей со струйным
управлением циркуляцией. - В сб.: Горные
машины. Конструкция, расчет и исследова-
ние горных машин. – Свердловск: НИПИ-
гормаш, 1991, с. 56-61.
4. Соломахова Т.С. Расчет аэродина-
мических характеристик вращающихся кру-
говых решеток профилей, очерченных по
логарифмическим спиралям. – В сб.: Про-
мышленная аэродинамика. – М.: Машино-
строение, 1966, вып.28, с. 33-59.
5. Шурыгин В.М. Аэродинамика тел
со струями. – М.: Машиностроение, 1977. -
200 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Макаров В.Н. – доктор технических наук,
Белов С.В. – профессор, кандидат технических наук,
Горшков О.В. – аспирант,
ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет».

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 20 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. В.И. Галкин.

