

УДК 622.44

## АНАЛИЗ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

В. Н. Макаров, С. А. Горбунов, Т. А. Корнилова

Предложен перспективный способ повышения аэродинамической нагруженности и адаптивности вентиляторов местного проветривания. С использованием метода комплексного интегрирования теории вычетов, метода конформного отображения и уравнения Кристоффеля–Шварца получена формула для расчета циркуляции на профилях круговой решетки с вихреисточниками в угловых точках. Установлено, что вихреисточники устраняют ветвление потока в угловых точках профиля, т. е. обеспечивают их плавное обтекание, что существенно повышает аэродинамическую нагруженность и регулируемость вентиляторов.

**Ключевые слова:** вентилятор; циркуляция; вихревая камера; аэродинамическая схема; аэродинамическая нагруженность; вихреисточник; круговая решетка профилей; метод конформного отображения.

Существенная энергоемкость вентиляции газообильных угольных шахт делает актуальной проблему надежного и экономичного проветривания и, как следствие, разработку высокоэффективных вентиляторных комплексов проветривания. Вентиляторы местного проветривания (ВМП), входящие в состав этих комплексов, предназначены для активного аэродинамического взаимодействия через общешахтную вентиляционную сеть с вентиляторами главного проветривания (ВГП) для создания условий, обеспечивающих аэродинамическую изоляцию очистной выработки от выработанного пространства в условиях интенсификации угледобычи.

Комбинированное проветривание газообильных угольных шахт в условиях многосвязной вентиляционной системы реализует новый подход к проектированию и созданию шахтных вентиляторов местного проветривания. Совокупность шахтных вентиляторов, работающих на комбинированную вентиляционную систему угольной шахты, может обеспечить аэрогазодинамическую изоляцию очистной выработки от выработанного пространства. Это позволяет отдельно удалять метан допустимой концентрации из разрабатываемого пласта по вентиляционной сети за счет общешахтной депрессии, создаваемой ВГП и ВМП, и высококонцентрированную

метано-воздушную смесь из пластов по газотводящей сети.

Таким образом, ВМП в условиях высокомеханизированной добычи угля со значительной динамикой изменения геометрических и аэродинамических параметров очистной выработки играет основную роль в оптимизации коэффициента распределения воздуха  $K_p$ , интегрально характеризующего степень обеспечения аэродинамической изоляции очистной выработки от выработанного пространства.

Коэффициент распределения воздуха  $K_p$  зависит от величины возвращаемых утечек из выработанного пространства. При этом расход отводимого метана нарастающий с увеличением длины выработанного пространства, и концентрация метана на исходящей струе выемочного участка зависят от величины  $K_p$  [1].

Интенсификация угледобычи приводит к необходимости роста развиваемого давления и глубины экономичного давления ВМП [1] для обеспечения аэродинамической изоляции очистной выработки от выработанного пространства. Это требует разработки ВМП повышенной аэродинамической нагруженности и адаптивности.

Применительно к ВМП наиболее перспективным способом повышения аэродинамической нагруженности, адаптивности и

экономичности является вихревое управление обтеканием лопаток рабочего колеса. В зависимости от параметров управляющего потока достижимо такое воздействие на пограничный слой, при котором наблюдается практически только снижение потерь давления на трение и, как результат, повышение КПД, либо управление им с влиянием на ядро потока для целенаправленного увеличения угла выхода потока, изменения циркуляционного течения с целью повышения аэродинамической нагруженности вентилятора [2].

Конструктивные особенности ВМП позволяют реализовывать в них прямоточную радиально-вихревую аэродинамическую схему с вихревым управлением течением в межлопаточных каналах рабочих колес с применением интегрированных вихреисточников с использованием высокоэнергетического закрученного управляющего потока без применения дополнительных устройств подвода энергии. Это существенно повышает эффек-

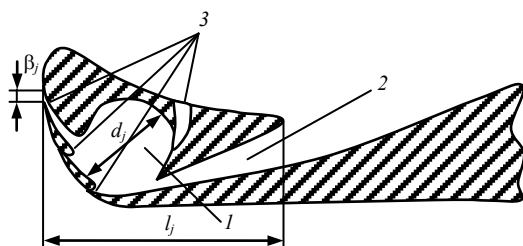


Рис. 1. Выходной участок лопатки с вихревой камерой

тивность их взаимодействия с основным потоком, при этом обеспечивая достаточную простоту и надежность конструктивного исполнения вихревых камер.

Конструкция и основные геометрические параметры вихревой камеры лопатки рабочего колеса вентилятора местного проветривания приведены на рис. 1 [3]. При этом количество вихревых камер  $j = k$  определяется возможностью конструктивного использования лопаток рабочего колеса и требованиями к аэродинамической характеристике вентилятора.

При вращении рабочего колеса под действием центробежной силы воздух по входному каналу 2 поступает в вихревую камеру 1, закручиваясь в ней со скоростью, существенно превышающей скорость вращения рабочего колеса, и в виде завихренной струи управляющего потока выходит через конфу-

зорные выходные каналы 3. Это способствует устранению отрывного вихреобразования, увеличению угла выхода потока и, как результат, росту аэродинамической нагруженности и экономичности вентилятора [4].

До настоящего времени не разработан математический аппарат расчета предлагаемых аэродинамических схем.

Аэродинамический профиль предлагаемой лопатки рабочего колеса с вихревыми камерами, имеющими выходные каналы на ее тыльную и рабочую поверхности, с позиции гидродинамической аналогии может быть представлен в виде полигонального контура (кусочно-гладкого профиля, в угловых точках  $j$  которого расположены вихреисточники). Притоком для указанных вихреисточников

служат стоки  $q_j^c$ , расположенные на рабочей поверхности профиля, каналы которого имеют тангенциальный вход в вихревые камеры, создавая тем самым циркуляцию вихря  $i\Gamma_j$ . При этом расход вихреисточника распределя-

ется поровну на рабочую  $q_j^{n1}$  и тыльную  $q_j^{n2}$  поверхности профиля.

На рис. 2 приведена круговая решетка кусочно-гладких профилей приведенного на рис. 1 профиля [5]. Кусочно-гладкий профиль круговой решетки состоит из нескольких частей, образованных логарифмическими спиралями с углами раскрытия  $\beta_j$ , где  $j = 1, \dots, k$  – количество частей кусочно-гладкого профиля, в угловых точках которого расположены  $(k - 1)$ -вихревые камеры.

При условии односвязности области  $D_z$  функцию конформного отображения внешности круга единичного радиуса на  $n$ -листной римановой поверхности в области  $D_\gamma$  на внешность  $4(k - 1)$ -листного полигонального контура схематизированной круговой решетки кусочно-гладких профилей, в угловых точках которых расположены вихревые камеры, в области  $D_z$ , получим с учетом формулы Кристоффеля–Шварца [5]:

$$z_j = \int_{\gamma} \frac{(\gamma - \tau_j)^{\bar{\beta}_j - 1} \prod_{j=1}^k (\gamma - \tau_j)^{\bar{\beta}_j - 1}}{(\gamma - \Phi_j^{-1})(\gamma - \Phi_j)} d\gamma,$$

где  $\tau_j$  – точки на окружностях радиусов  $\rho_j$ , соответствующие угловым точкам кусочно-

гладкого аналитического контура, в которых расположены вихревые камеры в области  $D_\gamma$ ;  $\beta_j = \pi\bar{\beta}_j$  – внешние углы  $4(k-1)$ -листного полигонального контура круговой решетки профилей, соответственно, в угловой точке  $\tau_j$  схе-

матизированного вихревого устройства с его стоком и источниками  $q_j^{n1} - q_j^{n2} = 0,5q_j^c$ .

Таким образом, задача сводится к определению функции конформного отображения схематизированной круговой решетки про-

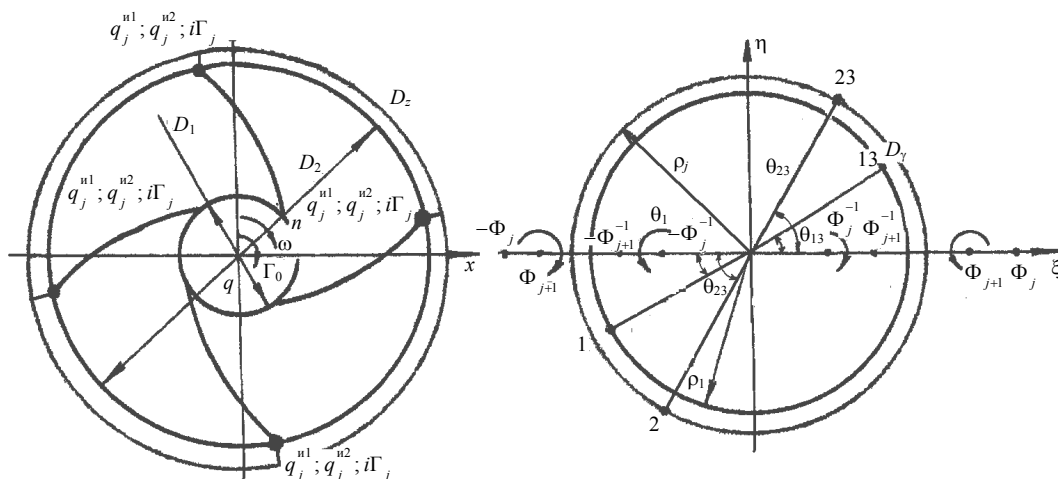


Рис. 2. Круговая решетка кусочно-гладких профилей в виде логарифмической спирали и соответствующая ей совокупность концентрических окружностей при  $k = 2$

филей с особенностями в виде  $(k-1)$  стоков, источников и вихрей  $4(k-1)$ -листной римановой области  $D_z$  на  $2n$ -листную риманову область  $D_\gamma$ , образованную  $k$  концентрическими окружностями в области  $D_\gamma$  вне кольца с единичным внутренним радиусом  $\rho_1 = 1$ .

Представим круговую решетку кусочно-гладких профилей из отрезков логарифмических спиралей в виде  $k$  круговых решеток, следующих одна за другой. Воспользовавшись принципом гидродинамической аналогии для потенциальных течений в областях  $D_z$  и  $D_\gamma$ , получим

$$z_j = \sqrt[n]{\frac{\gamma + \Phi_j}{(\gamma - \Phi_j)^{\frac{n}{2i\beta + \bar{\rho}}}}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma + \Phi_j^{-1}}{\gamma - \Phi_j^{-1}}}, \quad (1)$$

где  $\bar{\rho} = \ln \rho$ .

Данные соотношения соответствуют уравнению, полученному в [4] при раздельном рассмотрении  $k$  круговых решеток профилей. Внутренняя окружность кольца области  $D_\gamma$ , которой соответствует конформное отображение  $z(\gamma)$  области  $D_z$ , имеет  $\rho_1 = 1$ , а внешняя окружность кольца области  $D_\gamma$ , которой соответствуют функции конформного отображения  $z(\gamma)$ , имеет  $\rho_j > 1$ .

Формпараметры  $\Phi_j$  круговой кусочно-гладкой решетки профилей определяются из условия нарушения конформности в угловых точках

$$\frac{dz_j}{d\gamma} = 0 \text{ при } \gamma_j = \exp(i\theta_{jk}), j = 1, \dots, k. \quad (2)$$

Для построения функции комплексного потенциала течения в области  $D_\gamma$  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 получаемого решения при расчете циркуляции вокруг вращающейся круговой решетки кусочно-гладких профилей.

В качестве такого условия единственности решения принят принцип Жуковского–Чаплыгина–Кутта о сходе потока с задней критической точки аналитического профиля [1].

Таким образом, с учетом (1) и (2) получаем систему  $(2k-1)$  уравнений, однозначно определяющих при заданных углах раскрытия отрезков логарифмической спирали  $\beta_j$ -профиля величину циркуляции вихрей  $\Gamma_{k-1}$  и расход стока в  $q_{k-1}^c$   $(k-1)$  угловых точках ку-

сочно-гладкого профиля, угол раскрытия логарифмической спирали профиля  $\beta_j$ .

В соответствии с общей теорией аэродинамического расчета вращающейся круговой решетки аналитических профилей с вихревым управлением циркуляцией и математической моделью, изображенной на рис. 2, урав-

$$\Gamma = \sum_{j=1}^{k-1} \frac{\bar{q}_j^c \sin(\theta_{(j+1)(j+2)} - \theta_{13})}{\left[1 - \cos(\theta_{(j+1)(j+2)} - \theta_j)\right]} + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{\Phi_j \bar{q}_j^c \sin \theta_{(j+1)(j+2)}}{(\Phi_j^2 - 1)} +$$

$$+ \sum_{j=1}^{k-1} \Gamma_j \frac{\Phi_j \cos \theta_{(j+1)(j+2)}}{(\Phi_j^2 + 2\Phi_j \cos \theta_{(j+1)(j+2)} + 1)} +$$

$$+ \sum_{j=1}^{k-1} 4q \frac{\left[1 + n\bar{q}_j (\Phi_j^2 - 1)^2 (\Phi_j^2 + 2\Phi_j \cos \theta_{j3} + 1)^2\right] \Phi_j (\Phi_j^2 + 1) \sin \theta_{j3}}{n(\Phi_j^2 - 1)(\Phi_j^2 + 2\Phi_j \cos \theta_{j3} + 1)} -$$

$$- \sum_{j=1}^{k-1} \frac{2\pi \bar{V}_{13} (\Phi_j^2 + 2\Phi_j \cos \theta_{j3} + 1)}{(\Phi_j^2 - 1)} - \sum_{j=1}^{k-1} \frac{4\Gamma_0 \Phi_j \cos \theta_{j3}}{n(\Phi_j^2 + 2\Phi_j \cos \theta_{j3} + 1)}.$$

и, как следствие, к росту аэродинамической нагруженности рабочего колеса вентилятора. При этом вихреисточник закручивает поток в направлении к тыльной поверхности профиля, что позволяет применить данную конструкцию в рабочих колесах с загнутым вперед профилем, обладающим высокой аэродинамической нагруженностью, сохраняя при этом высокую экономичность ВМП.

Учитывая распределение скоростей в затопленной турбулентной струе, полученное Г. Гертлером с использованием гипотезы Л. Прандля о длине турбулентного перемешивания, получим оптимальное соотношение между параметрами вихревой камеры. Максимальная аэродинамическая нагруженность рабочего колеса при минимальном отрывном вихреобразовании:

$$\bar{d}_j = \frac{2\pi}{K_j} \sqrt{\frac{3\bar{l}_j \bar{h}_j}{C}},$$

где  $K_j$  – коэффициент реактивности вихреисточника,  $K_j = \text{ctg } q_j / \rho_j$ ,  $q_j$  – коэффициент рас-

нение для коэффициента циркуляции вокруг кусочно-гладкого профиля вращающейся круговой решетки получим в виде:

Изменение циркуляции вихреисточников, расположенных в угловых точках кусочно-гладкого профиля, приводит к изменению кривизны аэрогазодинамического профиля

хода  $j$ -го вихреисточника;  $\rho_j$  – коэффициент циркуляции  $j$ -го вихреисточника;  $C$  – эмпирическая постоянная, характеризующая полноту профиля скоростей и определяемая турбулентностью управляющей струи и потока воздуха в рабочем колесе вентилятора [6].

Проведенные экспериментальные исследования на базе вентилятора ВРВП-6 показали, что применение вихревой камеры с соотношением геометрических параметров, определяемым по приведенной формуле при  $\bar{d}_1 = 0,056$ ,  $\bar{d}_2 = 0,062$ , позволяет повысить коэффициент полного давления вентилятора до величины  $\psi = 1,32$ , т. е. на 42 %, а КПД на номинальном режиме на 3 %.

Таким образом, применение вихреисточников на лопатках рабочих колес вентиляторов местного проветривания позволяет устранить отрывное вихреобразование в межлопаточных каналах и повысить их аэродинамическую нагруженность, тем самым способствуя повышению экономической эффективности вентиляционной системы угольных шахт.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Золотых С. С., Стекольников, Денисенко С. И. Руководство по проектированию комбинированного проветривания выемочных участков и полей с применением газоотсасывающих вентиляторных установок для шахт ОАО «Компания «Кузбассуголь». Кемерово, 2000. 124 с.
2. Фомин В. И. Аэродинамическая характеристика центробежного вентилятора с радиальным энергетическим регулятором // Известия УГТУ. 2010. Вып. 24. С. 111–114.
3. Пат. 2430274 Российская Федерация, МКИ F 04 Д 29/28. Радиально-вихревая турбомашина / Косарев Н. П., Макаров Н. В., Макаров В. Н. Оpubл. в Б. И. 27.09.2011.
4. Пат. 2390658 Российская Федерация, МКИ F 04 Д 29/28. Рабочее колесо центробежного вентилятора / Макаров Н. В., Белов С. В., Фомин В. И. и др. №112791/06; заявл. 02.04.08; опубл. в Б. И., 2010, Бюл. № 15.
5. Косарев Н. П., Макаров В. Н. Математические модели аэродинамики вращающихся круговых решеток аналитических профилей произвольной формы со струйным управлением циркуляцией. Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2005. 93 с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 687 с.

Поступила в редакцию 27 июня 2013 г.

**Макаров Владимир Николаевич** – профессор, доктор технических наук, начальник Управления инноватики и развития. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: Uk.intelnedra@gmail.com

**Горбунов Сергей Андреевич** – аспирант, начальник отдела трансфера и технологий. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

**Корнилова Татьяна Александровна** – аспирант, помощник начальника Управления инноватики и развития. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.