

Д. Т. Н. В. Н. Макаров, д. т. н. С. Я. Давыдов (✉)

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»,
г. Екатеринбург, Россия

УДК 622.44:666

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЯЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

По результатам проведенных проектно-конструкторских исследований предложены запатентованные технические решения, реализующие вихревое управление течением воздуха в межлопаточных каналах рабочих колес радиальных вентиляторов с адаптивными вихреисточниками для повышения эффективности вентиляции на промышленных предприятиях. На базе метода конформных преобразований с использованием теории присоединенных вихрей, аэродинамики тел со струями, теории функции комплексного переменного предложена методика расчета радиальных вентиляторов с адаптивными вихреисточниками.

Ключевые слова: вентилятор, функциональная и экономическая эффективность, адаптивный вихреисточник, круговая решетка профилей.

Обеспечение конкурентоспособности промышленных предприятий на глобальном экономическом пространстве невозможно без ускорения темпов реконструкции действующих и создания новых производств с учетом передовых достижений науки, внедрения современного высокотехнологичного оборудования.

Энергоемкость вентиляции в стройиндустрии составляет 10–25 % в зависимости от технологической и производственной структуры [1]. При этом ежегодно непроизводительные затраты электроэнергии вентиляторами на технологическую и вспомогательную вентиляцию соизмеримы с их стоимостью.

За последние годы в вентиляторостроении сформировались существенные проблемы, обусловленные недостаточной эффективностью обеспечения параметров технологических процессов производства цемента и огнеупорных материалов, определяемых режимами вентиляции.

Технические параметры вентиляторов не в полной мере соответствуют современным требованиям, предъявляемым к системам вентиляции в технологических процессах, а также в производственных помещениях. Увеличение нагрузки на технологическое оборудование, интенсификация технологических процессов требуют применения вентиляторов, обладающих

большей аэродинамической нагруженностью и адаптивностью.

Теоретической основой запатентованного способа повышения эффективности вентиляции является разработка радиально-вихревых аэродинамических схем на базе круговых решеток кусочно-гладких профилей с адаптивными вихреисточниками, целенаправленно воздействующими на их эффективные критические точки для создания высоконагруженных адаптивных вентиляторов [2].

По назначению промышленная вентиляция подразделяется на технологическую, предназначенную для перемещения воздуха и газов в технологическом оборудовании, в системах очистки воздуха, для отсоса дымовых газов, и санитарно-техническую для вентиляции и обогрева промышленных зданий [1].

Высокий уровень запыленности приводит к существенному колебанию во времени проходимости вентиляционных систем, изменяя их аэродинамические параметры и, как следствие, создавая несоответствие фактических полей вентиляционных режимов и полей, потребных для обеспечения санитарно-гигиенических условий в части санитарно-технической вентиляции.

Особенность технологической вентиляции обусловлена широким диапазоном потребных полей вентиляционных режимов, динамикой их изменения в технологическом процессе и определяется не только заданными параметрами технологического процесса, но и широким разбросом характеристик исходного сырья, существенно влияющих на параметры технологи-



С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

ческого процесса, обеспечивающие требуемое качество выпускаемой продукции.

По принципу обеспечения адаптивности вентиляционной системы, т. е. изменения параметров в соответствии с внешними условиями, различают три способа получения необходимых полей вентиляционных режимов: 1 — формирование вентиляционных режимов в соответствии с аэродинамической характеристикой вентиляторов, т. е. применением вентиляторов без устройств регулирования; 2 — обеспечение вентиляционных параметров по заданной программе применением вентиляторов с устройствами регулирования расхода воздуха и депрессии; 3 — комбинированное применение вентиляторов с регулируемым приводом и устройств повышения адаптивности вентиляторов. Применение того или иного из вышеперечисленных способов обусловлено в первую очередь техническим уровнем производства, использованием современного высокотехнологичного вентиляционного оборудования.

Энергоемкость вентиляции при производстве строительных материалов зависит от коэффициента экономической эффективности $\mathcal{E}_\psi$. Степень соответствия вентиляционных параметров требованиям технологического процесса определяет функциональную эффективность вентиляционной системы $\mathcal{E}_\phi$ (рис. 1).

Эффективность устройств регулирования аэродинамических параметров вентилятора характеризуется глубиной экономичного регулирования давления и производительности вентилятора:

$$\Gamma_\psi = \frac{\psi_{\max} - \psi_{\min}}{\psi_{\max}}; \quad \Gamma_q = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{\max}}, \quad (1)$$

где ψ , q — коэффициенты полного давления и производительности вентилятора, зависящие от составляющих скорости воздуха в проточной части рабочего колеса.

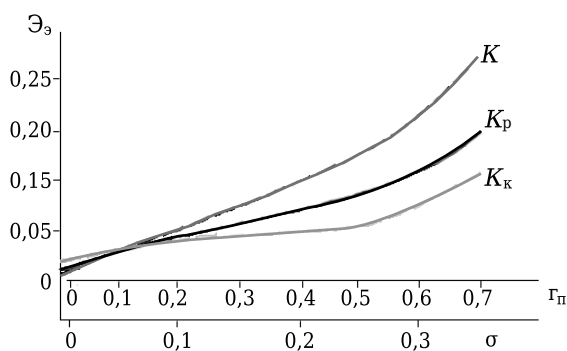


Рис. 1. Относительные удельные затраты электроэнергии $\mathcal{E}_\psi$ на вентиляцию в структуре себестоимости производства цемента: K — вентиляторы без регулирующих устройств; K_p — вентиляторы с регулируемыми устройствами; K_k — вентиляторы с повышенной адаптивностью; Γ_p — глубина изменения параметров; σ — дисперсия проходимости

Адаптивность вентилятора характеризует степень обратной связи ее аэродинамических параметров с параметрами проходимости вентиляционной системы и, следовательно, стабильность аэродинамической характеристики турбомашин в условиях колебания параметров вентиляционной системы. Коэффициент адаптивности A определяют по формуле

$$A = \Delta q / \Delta P, \quad (2)$$

где Δq — изменение производительности вентилятора, обусловленное изменением проходимости вентиляционной системы, т. е. ее аэродинамического сопротивления; ΔP — изменение проходимости вентиляционной системы.

Адаптивность вентилятора взаимосвязана с коэффициентом K_ψ его аэродинамической нагруженности:

$$K_\psi = \frac{\int_{q_{\min}}^{q_{\max}} \frac{d\psi}{dq} dq}{\int_{q_{\min}}^{q_{\max}} dq}. \quad (3)$$

С увеличением K_ψ уменьшается диапазон колебания производительности вентилятора при заданном изменении проходимости вентиляционной системы, поскольку большие значения K_ψ соответствуют большему значению тангенса угла наклона кривой аэродинамической характеристики вентилятора [3].

Таким образом, функциональная эффективность вентиляционной системы будет определяться глубиной экономичного урегулирования (1) и аэродинамической нагруженностью (3), т. е. адаптивностью вентилятора (2). Наиболее перспективным путем повышения функциональной и экономической эффективности вентиляционных систем является комбинированное применение современных регулирующих устройств и повышение адаптивности вентиляторов.

На рис. 1 представлены результаты исследования зависимости коэффициента экономической эффективности $\mathcal{E}_\psi$ от диапазона изменения параметров вентиляционной системы и технологического процесса для различных способов достижения требуемых вентиляционных режимов.

Из анализа рис. 1 видно, что первый способ эффективен при потребной глубине изменения параметров вентиляционных полей $\gamma \leq 0,1$ и дисперсии проходимости σ вентиляционной системы не более 0,05; второй способ эффективен при $0,1 \leq \gamma \leq 0,2$ и σ не более 0,1.

Таким образом, при дисперсии проходимости вентиляционной системы более 0,1 и диапазоне изменения потребных параметров вентиляционных полей $\gamma > 0,2$ наиболее эффективной является

ся система вентиляции с использованием турбомашин, обладающих повышенной адаптивностью.

Учитывая, что на предприятиях строительной индустрии применяют в основном радиальные вентиляторы, наиболее перспективным способом повышения аэродинамической нагруженности, адаптивности и, как результат, их эффективности является применение активного управления обтеканием лопаток рабочего колеса [2].

Конструктивные особенности радиальных вентиляторов позволяют реализовывать в них радиально-вихревую аэродинамическую схему с энергетическим управлением течением в межлопаточных каналах рабочих колес за счет адаптивных вихреисточников. Использование высокоэнергетического циркуляционного потока воздуха без дополнительных устройств подвода энергии существенно повышает эффективность их взаимодействия с основным потоком, обеспечивая простоту и надежность конструктивного исполнения вентиляторов.

Полости профильных радиальных лопаток, выполненных в форме вихревых камер, являющихся одновременно нервюрами жесткости, представляют собой интегрированный в рабочее колесо вихревой компрессор, геометрические параметры которого обеспечивают требуемые энергетические характеристики вихреисточников. При этом характер течения потока в вихревых камерах исключает их заштыбовку пылью вследствие значительного воздействия на взвешенные частицы центробежных сил.

В отечественной и зарубежной литературе отсутствуют данные об исследованиях метода вихревого управления обтеканием лопаток рабочих колес радиальных турбомашин, выборе оптимальных энергетических характеристик управляющего потока вихреисточников, геометрических параметров вихревых камер и конструктивной их реализации.

Анализ и обобщение известных активных методов управления обтеканием изолированных профилей подтвердил эффективность вихревого

управления течением в проточной части радиальных турбомашин с целью повышения их аэродинамической нагруженности и адаптивности [2].

По результатам проведенных проектно-конструкторских исследований предложены запатентованные технические решения, реализующие вихревое управление течением в межлопаточных каналах рабочих колес радиальных вентиляторов с использованием адаптивных вихреисточников для повышения аэродинамической нагруженности, адаптивности (рис. 2) [4, 5].

На рис. 2 представлен кусочно-гладкий профиль, составленный из k отрезков круговой решетки, снабженный встроенными в него $j = k$ цилиндрическими вихревыми камерами 1, тангенциальными входными каналами 2 со стороны его рабочей поверхности 3 и тангенциальными выходными каналами 4 с выходом на рабочую 3 и тыльную 8 поверхности.

При вращении рабочего колеса радиального вентилятора высокоэнергетический адаптивный вихреисточник формируется в вихревой камере 1 за счет тангенциального входа потока 2, а его взаимодействие с лопаткой, обеспечивающее рост циркуляции вокруг нее, осуществляется через тангенциальные выходы потока 4. При этом выходной канал 4 на рабочей поверхности 3 лопатки расположен вниз по потоку, т. е. ближе к ЗКГТ профиля лопатки по отношению к входу 2 в вихревую камеру 1. Это обеспечивает эффективное формирование замкнутого вихря вокруг рабочего колеса радиального вентилятора [2].

Характерная особенность адаптивного вихреисточника — наличие обратной аэрогазодинамической связи его энергетических характеристик с аэродинамическими параметрами вентиляционной сети, на которую работает вентилятор, что обеспечивает стабилизацию производительности вентилятора при значительных колебаниях проходимости вентиляционной системы.

Это наглядно демонстрирует рис. 3, на котором представлены диаграммы изменения относительной V_2 , V_2^a и абсолютной C_2 , C_2^a скоростей

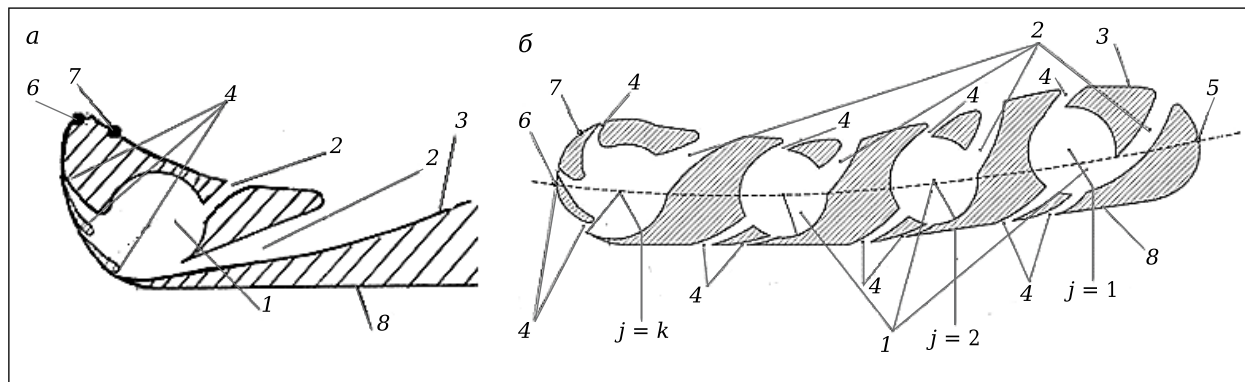


Рис. 2. Кусочно-гладкий профиль круговой решетки с адаптивными вихреисточниками: а — адаптивный вихреисточник с одной вихревой камерой ($k = 1$); б — адаптивные вихреисточники с k вихревыми камерами ($k > 1$); 5 — передняя критическая точка профиля (ПКТ); 6 — задняя критическая геометрическая точка (ЗКГТ); 7 — эффективная критическая точка (ЭКТ); остальные обозначения — в тексте

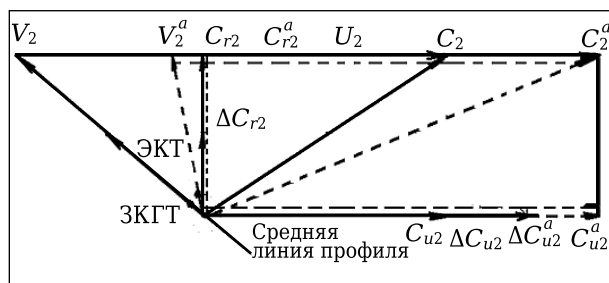


Рис. 3. Диаграмма скоростей воздуха на выходе из рабочего колеса вентилятора: — — диаграмма скоростей V_2 , C_2 , C_{r2} , C_{u2} для рабочего колеса классической схемы; --- — диаграмма скоростей V_2^a , C_2^a , C_{r2}^a , C_{u2}^a для рабочего колеса с адаптивными вихреисточниками

воздуха на выходе из рабочих колес, выполненных соответственно по классической аэродинамической схеме и с адаптивным вихреисточником.

При уменьшении проходимости вентиляционной сети, способствующей росту давления на рабочей поверхности лопатки, происходит увеличение циркуляции замкнутого вихря и, как результат, рост давления, развиваемого вентилятором за счет роста окружной составляющей абсолютной скорости C_{u2}^a на величину ΔC_{u2}^a , при сохранении радиальной составляющей абсолютной скорости C_{r2}^a и, следовательно, при сохранении производительности вентилятора.

Таким образом, адаптивные вихреисточники способствуют не только увеличению циркуляции, т. е. аэродинамической нагруженности круговой решетки кусочно-гладких профилей, но и адаптивности, т. е. изменению аэродинамических параметров создаваемых на их основе радиальных вентиляторов без отрывного вихреобразования в соответствии с изменениями характеристик внешней сети, в то время как для классической круговой решетки характерно увеличение давления, развиваемого турбомашинной в связи с падением проходимости вентиляционной сети из-за изменения параметров исходного сырья и запыленности трубопровода, за счет уменьшения расходной скорости C_{r2} , т. е. уменьшения производительности вентилятора, что приводит к снижению его адаптивности.

На базе метода конформных преобразований с использованием теории присоединенных вихрей, аэродинамики тел со струями, теории функции комплексного переменного построена математическая модель аэродинамики вращающейся круговой решетки кусочно-гладких профилей с адаптивными вихреисточниками [1, 2].

Каноническое представление круговой решетки профилей с адаптивными вихреисточниками в виде $4k$ -листного контура позволяет свести задачу аэродинамического расчета вращающейся круговой решетки кусочно-гладких профилей произвольной формы с вихревым управлением циркуляцией на базе использования теоремы Ри-

мана для односвязных многолистных областей к построению двух аналитических функций: функции $R(r)$ отображения nk -листной римановой области внешности окружностей радиусов $l_j \geq 1$ на область течения, ограниченную $4k$ -листным контуром римановой области круговой решетки кусочно-гладких профилей с адаптивными вихреисточниками, и комплексного потенциала $P[R(r)]$ в nk -листной римановой области кругов радиусами $l_j \geq 1$ [2].

Давление, развиваемое вентилятором, и, как результат, его производительность при заданной проходимости вентиляционной системы определяются циркуляцией потока воздуха в его рабочем колесе [3].

С учетом изложенного, а также результатов, приведенных в работе [2], коэффициент циркуляции ρ вокруг кусочно-гладкого профиля с адаптивными вихреисточниками в k угловых точках на $4k$ -листном контуре круговой решетки определяется по формуле

$$\rho = 2\pi \sum_{j=1}^k l_j^2 \sin \theta_{0m}^j \sum_{n=1}^3 \left(l_{0n}^j + \frac{1}{l_{0n}^j} \right) \sin \theta_{0n}^j + 2\pi \sum_{j=1}^k l_j^3 \sin(\theta_{0l}^{j+1} - \theta_{0k}^j), \quad (4)$$

где m, n — подвижные и фиксированные особые точки на $4k$ -листном контуре круговой решетки кусочно-гладких профилей с адаптивными вихреисточниками соответственно; $\theta_{0l}^{j+1} - \theta_{0k}^j = \Delta \theta_{0l}^j$ — угол между ЗКТ и ЭКТ j -го отрезка кусочно-гладкого профиля.

Наличие адаптивного вихреисточника в угловых точках кусочно-гладкого профиля позволяет обеспечить плавное их обтекание, устраняя тем самым отрывное вихреобразование, позволяя создавать аэродинамически устойчивые профили большой кривизны, отличающиеся высокой аэродинамической нагруженностью.

Используя уравнение (4), при заданных геометрических параметрах вихревых камер можно определять коэффициент циркуляции круговой решетки профилей с адаптивными вихреисточниками и осуществлять инженерные расчеты радиально-вихревых аэродинамических схем повышенной аэродинамической нагруженности и адаптивности с управляемой циркуляцией [2, 3, 6].

Результаты экспериментальных исследований с использованием радиально-вихревого вентилятора предложенной в данной статье конструкции подтвердили возможность увеличения глубины экономичного регулирования производительности вентилятора g_q до значения 0,75, его коэффициента аэродинамической нагруженности K_ψ до величины 1,45, что позволяет снизить энергоемкость вентиляции при обеспечении заданных функциональных параметров технологического процесса не менее чем на 22 %, снизив

при этом себестоимость производства цемента на 4–5 % [7].

Таким образом, применение на огнеупорных и цементных предприятиях вентиляторов повышенной адаптивности и аэродинамической нагружен-

ности, выполненных по аэродинамическим схемам с адаптивными вихреисточниками, позволяет повысить энергоэффективность вентиляции на 22 %, снизить себестоимость производства на 4–5 %, достигнув при этом конкурентного преимущества.

Библиографический список

1. **Давыдов, С. Я.** Вращающиеся печи предприятий строительных материалов : учебное пособие / *С. Я. Давыдов, В. А. Пьячев, И. Д. Кащеев* [и др.]. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. — 352 с.
2. **Косарев, Н. П.** Математические модели аэродинамики вращающихся круговых решеток аналитических профилей произвольной формы со струйным управлением циркуляцией : научное изд. / *Н. П. Косарев, В. Н. Макаров*. — Екатеринбург : УГГУ, 2005. — 93 с.
3. **Иванов, О. П.** Аэродинамика и вентиляторы : учебное изд. / *О. П. Иванов, В. О. Мамченко*. — Л. : Машиностроение, 1986. — 280 с.
4. **Пат. 2390658 РФ.** Рабочее колесо центробежного вентилятора / Макаров Н. В., Белов С. В., Фомин В. И. и др. ; заявл. 02.04.08 ; опубл. 27.05.10, Бюл. № 15.
5. Решение о выдаче патента от 13.05.2014 на изобретение по заявке № 2013122974/06 от 20.05.2013. Радиально-вихревая турбомашина / Макаров Н. В., Макаров В. Н., Абдулкаримов М. К. и др.
6. **Макаров, В. Н.** Расчет идеальной характеристики центробежного вентилятора с аэрогазодинамическими профилями / *В. Н. Макаров, Н. П. Косарев* // Горный вестник Узбекистана. — 2012. — № 4. — С. 101–104.
7. **Косарев, Н. П.** Генезис эффективности проветривания / *Н. П. Косарев, В. Н. Макаров* // Изв. вузов. Горный журнал. — 2012. — № 1. — С. 22–26. ■

Получено 19.08.14

© В. Н. Макаров, С. Я. Давыдов, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



11-я Международная Азиатско-Тихоокеанская конференция по керамике

30 августа – 4 сентября 2015 г.

о. Чеджу, Корея



Техническая программа:

1. Многомасштабное моделирование
2. Инновационные методы обработки и производства керамики
3. Нанотехнологии для получения конструкционной керамики
4. Многофункциональные материалы и системы
5. Керамика для энергетики и защиты окружающей среды
6. Керамика в биологии, медицине и охране здоровья человека
7. Специальные симпозиумы

www.pacrim11.org