

Стешенко В.А., канд.техн.наук (НИИГМ им. М.М.Федорова)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАДИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОРМЫ ПРОФИЛЬНЫХ ЛОПАТОК РАБОЧИХ КОЛЕС

У статті наведені теоретичні і експериментальні дослідження модельних аеродинамічних характеристик шахтних радіальних вентиляторів головного провітрювання з максимальними показниками економічності, що необхідно реалізовувати в проектах вентиляторних установок головного провітрювання вугільних шахт та рудників, а також в інших галузях промисловості.

В статье приведены теоретические и экспериментальные исследования модельных аэродинамических характеристик шахтных радиальных вентиляторов главного проветривания с максимальными показателями экономичности, которые необходимо реализовывать в проектах вентиляторных установок главного проветривания угольных шахт и рудников, а также в других отраслях промышленности.

In the article given the theoretical and experimental research of the model aerodynamic characteristics of the radial mining fans of the main airing with the maximum index of the economization, to be realized in the project fan units of the main airing of the coal mines and pits, and also in other industrial branches.

КС: шахтні радіальні вентилятори, економічність, робоче колесо, профільна лопатка, КПД вентилятора, аеродинамічні схеми.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Шахтные вентиляторы главного проветривания являются одними из основных потребителей электроэнергии, энергозатраты которых составляют в среднем 20...30 % от общего расхода электроэнергии при эксплуатации шахты.

Если учесть, что мощность приводного электродвигателя наиболее мощного шахтного вентилятора типа ВЦД-47,5УМ составляет 4000 кВт, а эксплуатируется он непрерывно на шахтную вентиляционную сеть, то экономичность его работы (статический КПД) и расположение рабочих режимов вентиляторов в рабочей области согласно действующему стандарту охватывают подачи воздуха от минимальной Q_{\min} до максимальной Q_{\max} , а статические давления от минимальных $P_{sv \min}$ до максимальных $P_{sv \max}$ являются определяющей величиной. В пределах этой области должен обеспечиваться статический КПД $\eta_{sv} \geq 0,6$, устойчивость, однозначность рабочего режима вентилятора и подача воздуха при реверсировании воздушной струи на любом режиме радиального вентилятора должны составлять не менее 60% от подачи при прямой работе (на всасывание) [13].

В связи с изложенными аргументами вопросы повышения экономичности работающих на шахтную сеть вентиляторов главного проветривания являются важнейшей проблемой, которая должна решаться в научных и практических направлениях с проведением соответствующих исследований.

Изложение основного материала. Известно, что радиальные вентиляторы, как и осевые, являются основными средствами главного проветривания шахт и рудников, но могут применяться также в мощных дутьевых вентиляционных системах и дымососах промышленной энергетики.

Одним из главных критериев, влияющих на эффективность работы шахтного вентилятора главного проветривания, является форма профиля лопаток рабочего колеса, которое размещается в спиральном корпусе вентилятора. К рабочему колесу воздух из шахтного ствола подводится по вентиляционным каналам, входным устройствам, направляющим аппаратам, входным конусам и лабиринтным устройствам. В табл. 1 приведены аэродинамические схемы радиальных вентиляторов и предприятия-разработчики этих схем, судя по литературным источникам [1,2,3,4,5,6], в которых представлены величины максимальных полных КПД модельных и натуральных вентиляторов с рабочими колесами, имеющими загнутые назад профильные лопатки.

Таблица 1.

Разработчики основных аэродинамических схем вентиляторов

№ п/п	Предприятия-разработчики аэродинамической схемы вентилятора	Название аэродинамической схемы вентилятора	Максимальный полный КПД вентилятора	Коэффициент профиля лопаток K_d
1	НИИГМ им. М.М.Федорова	Ц 38-23	0,86	2,50
2	НИИГМ им. М.М.Федорова	Ц 35-20	0,89	1,30
3	Мо ЦКТИ	0,68-161	0,86	3,40
4	НИИГМ им. М.М.Федорова	Ц 36-15	0,87	2,70
5	Мо ЦКТИ	0,7-160-II	0,85	1,05
6	ЦКТИ	Ц 59-15,1-30x2	0,88	1,10
7	ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского	Ц 4-76	0,84	0,90
8	ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского	Ц 4-52	0,84	3,35
9	ЦКТИ	0,7-160	0,85	4,50
10	НИИГМ им. М.М.Федорова	Ц 31-16	0,86	4,80



Рис. 1. Рабочее колесо радиального вентилятора с выпукло-вогнутыми лопатками

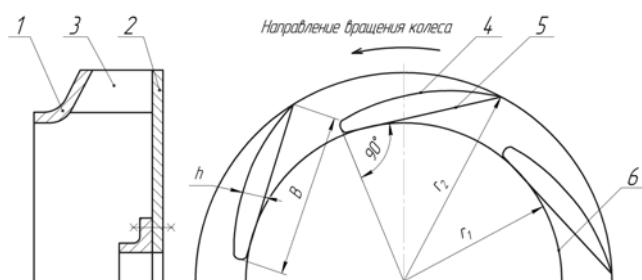


Рис. 2. Рабочее колесо радиального вентилятора с плоско-выпуклыми лопатками

Следует отметить, что вентиляторы радиального типа с профильными лопатками рабочих колес в отечественном и мировом вентиляторостроении отличаются формой лопаток и их расположением в рабочем колесе.

Если в поперечном сечении рабочего колеса высокоэкономичного вентилятора (рис. 1 и 2) определить коэффициент диффузорности межлопаточных каналов при входе потока воздуха по диаметру входа на лопатки D_1 и при его выходе из колеса D_2 , то можно оценить влияние этого параметра на величину максимального КПД вентилятора [15].

По данным теоретических и экспериментальных исследований, представленных в монографии [7] (гл. II, §3), при исследовании и разработке аэродинамической схемы высокоэкономичного вентилятора Ц36-15 показано, что одним из существенных

факторов для повышения КПД вентилятора является степень диффузорности межлопаточных каналов колеса, максимальная величина которой не должна превышать величину 3,5. Эта тенденция, которая была установлена теоретически и экспериментально, явилась основой при разработке одной из самых высокоэкономичных моделей радиальных вентиляторов Ц36-15 и ее модификаций, после чего были спроектированы шахтные радиальные вентиляторы и установки с вентиляторами ВЦ-16, ВЦ-25, ВЦ-31,5М2, ВЦД-31,5М2, ВЦД-47,5УМ, которые в настоящее время по действующему стандарту изготавливаются Артемовским машзаводом в Свердловской области и ПАО «Донецкгормаш». Эти вентиляторы радиального типа, наряду с вентиляторами осевыми ВОД-18, ВОД-21, ВОД-30М2, ВОД-40, ВОД-50 (производства Артемовского машзавода Свердловской области, ПАО «Донецкгормаш») являются основными средствами проветривания угольных шахт, а также могут быть применены для других отраслей промышленности, так как имеют наиболее высокие показатели реверсирования воздуха в шахту, по экономичности, по энергоэффективности, по удельному энергопотреблению и изготавливаются зарубежными фирмами и заводами Украины для различных отраслей промышленности [7,8,9,10,11,12,13,14,15]. При этом они имеют максимальные значения статических КПД – 0,85...0,86 – для радиальных вентиляторов и 0,80...0,81 – для осевых вентиляторов.

Авторами названных выше аэродинамических схем радиальных вентиляторов были ведущие специалисты по аэродинамике – д.т.н. В.С.Пак, д.т.н. В.В.Пак, д.т.н. Г.А.Бабак, д.т.н. Т.С.Соломахова, к.т.н. И.Л. Локшин, к.т.н. С.П.Лившиц и другие ученые.

Аэродинамические схемы осевых вентиляторов разработаны д.т.н. И.В.Брусилоским, д.т.н. Е.М.Левиным, к.т.н. В.А.Руденко, к.т.н. Ю.А.Гордиенко, к.т.н. В.Г.Бедимом и другими учеными.

Другим критерием для достижения максимальных значений КПД радиальных вентиляторов является совершенство формы и расположения профильных лопаток между дисками рабочих колес. При этом имеют место и другие аэродинамические факторы: углы входа и выхода потока на лопатки, углы атаки на входе потока на лопатки, диаметры входа потока в колесо, углы наклона передних дисков.

Целью предлагаемой вниманию статьи является определение зависимости максимальных значений полных КПД моделей радиальных вентиляторов от коэффициентов профилей лопаток рабочих колес с выпукло-вогнутыми профилями и плоско-выпуклыми. Предложенные к рассмотрению модели вентиляторов были изготовлены и испытаны на аэродинамических стендах по стандартной методике.

Испытанные в различных организациях схемы моделей и полученные аэродинамические характеристики по КПД были опубликованы в приведенных в статье литературных источниках и выбраны таким образом, чтобы сравнить влияние плоско-выпуклых профилей рабочих колес (схемы Ц35-20; Ц4-76; 07-160-II; 0,7-160; 0,68-161) с выпукло-вогнутыми (схемы Ц38-23; Ц36-15; Ц59-15,1-30x2; Ц31-16; Ц4-52) профилями.

На рис. 1 и 2 представлены схемы рабочих колес радиальных вентиляторов с выпукло-вогнутыми лопатками и плоско-выпуклыми профилями лопаток.

При этом введены обозначения:

r_2 – наружный радиус колеса;

r_1 – входной радиус расположения лопаток в колесе;

B – длина хорды профилей лопаток рабочих колес;

R_1 – радиус профиля нерабочей поверхности лопатки;

R_2 – радиус профиля рабочей поверхности лопатки.

Исходя из рис. 1 и 2, следует, что величина коэффициента профиля выпукло-вогнутой лопатки определяется соотношением

$$K_{Л} = \frac{B}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}} + \frac{R_1}{R_2}. \quad (1)$$

Для плоско-выпуклых лопаток коэффициент профиля лопаток выражается

$$K_{Л} = \frac{B}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}} + \frac{h}{B}, \quad (2)$$

где h – максимальная высота профиля лопатки от нерабочей плоской поверхности к рабочей криволинейной поверхности; B – длина хорды лопатки.

Представленные на рис. 3 величины максимальных полных КПД радиальных вентиляторов (отобраны наиболее представительные аэродинамические схемы), которые были осреднены показанной на рис. 3 кривой, определяющей зависимость максимальных значений полных КПД от коэффициентов профилей лопаток лучших отечественных аэродинамических схем радиальных вентиляторов, позволяют выделить область коэффициентов профилей лопаток, где может быть реализован максимальный экономический эффект вентилятора.

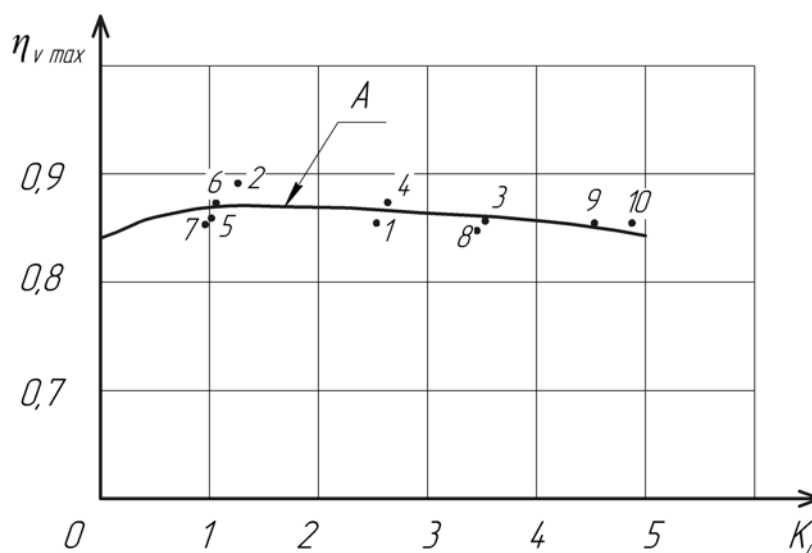


Рис. 3. Зависимость максимального КПД от коэффициентов профилей лопаток рабочих колес

Обобщенная (усредненная) кривая А (рис. 3) представляет зависимость максимальных значений полных КПД моделей наиболее эффективных радиальных вентиляторов десяти различных аэродинамических схем (табл. 1) в зависимости от коэффициентов профилей лопаток рабочих колес. Варианты аэродинамических схем вентиляторов на экспериментальной кривой А в интервале $K_{л}=1,0 \dots 3,0$ в точках 2, 4, 6 имеют относительно с другими схемами вентиляторов наиболее высокие максимальные показатели полных КПД 0,89; 0,87; 0,88 при погрешности их определения 0,5 % на аэродинамических стендах.

Рабочий процесс в колесе с лопатками, имеющими плоско-выпуклый профиль (рис.2), аналогичен рабочему процессу в колесе с выпукло-вогнутыми лопатками, но в варианте схемы с плоско-выпуклыми профилями в коэффициентах профилей лопаток была учтена величина отношения максимальной высоты профиля h от плоской (нерабочей) поверхности к криволинейной (рабочей) поверхности лопатки к хорде лопатки B , что является для аэродинамической схемы Ц35-20 существенным фактором при реализации максимального КПД вентилятора. Аэродинамическая схема Ц35-20 (рабочее колесо №39) после модельных экспериментов на аэродинамических стендах с диаметрами камер всасывания 1,5 м и 2,0 м и диаметром колеса модели 0,5 м была положена в основу проектов шахтных вентиляторов ВЦ-11, ВЦН-1,6 и ВЦ-2,2, которые были изготовлены Каменским машзаводом Ростовской области,

испытаны на шахтах, получили положительные аэродинамические и технические характеристики и были рекомендованы для дальнейшего промышленного производства на заводах-изготовителях для серийного производства [3, 6, 8].

Аэродинамическая схема Ц36-15 НИИГМ им. М.М. Федорова была разработана в 1970 году для создания самого мощного двустороннего вентилятора по развиваемым аэродинамическим параметрам (подача $500\text{ м}^3\text{ с}^{-1}$, статическое давление 700 даПа в номинальном режиме). Эти вентиляторы под шифром ВЦД-47 «Север» и необмерзаемая вентиляторная установка из двух вентиляторов были спроектированы институтом «Донгипроуглемаш», изготовлены заводом «Донецгормаш», успешно прошли промышленные и аэродинамические испытания в условиях Заполярья (г. Норильск, Норильский горно-металлургический комбинат) на руднике «Октябрьский».

Конструкция вентилятора ВЦД-47 «Север» модернизирована в 1978-1979 гг. совместно институтами «Донгипроуглемаш» и «НИПКИУглегормаш» взамен выпускавшегося с 1972 по 1979 гг. вентилятора ВЦД-47 «Север» без изменения основных его параметров и аэродинамической схемы установки, разработанной совместно ВНИИГМ им. М.М.Федорова и Донгипроуглемашем. Вентиляторные установки ВЦД-47 «Север» были применены для проветривания рудников цветной металлургии Норильского горно-металлургического комбината. При модернизации вентиляторов ВЦД-47 «Север» основные узлы и отдельные элементы вентилятора (подшипники ротора, корпус, входные устройства, ступица рабочего колеса и другие элементы) были частично или полностью унифицированы с соответствующими узлами и элементами вентилятора ВЦД-47У. Вентилятор ВЦД-47 «Север» после модернизации получил шифр ВЦД-47М «Север». Вентиляторы ВЦД-47У и необмерзаемая установка были спроектированы институтом «Донгипроуглемаш» по аэродинамической схеме Ц66-11х2 ВНИИГМ им. М.М.Федорова, изготовлены ПАО «Донецгормаш» и широко внедрялись с 1980 года для проветривания глубоких угольных шахт Украины взамен снятых с производства вентиляторов ВРЦД-4,5 и соответствующих установок, которые изготавливались ПАО «Донецгормаш» с 1963 года. Вентиляторы ВЦД-47У обеспечивали в номинальном режиме подачу $400\text{ м}^3\text{ с}^{-1}$ и статическое давление 600 даПа. Статический КПД вентилятора (номинальный) составил 0,85. В настоящее время вентиляторы ВЦД-47У (унифицированные и имеющие незначительные изменения рабочей части лопаток и плоские передние диски с лопатками по схеме Ц36-15) выпускаются ПАО «Донецгормаш» под шифром ВЦД-47,5УМ. Номинальный режим этого вентилятора по подаче составляет $400\text{ м}^3\text{ с}^{-1}$, статическое давление 750 даПа, максимальный статический КПД 0,85.

Разработка аэродинамической схемы Ц36-15 приведена в монографии [7]. Внедрение новых шахтных высокоэкономичных вентиляторов, аэродинамические и технические параметры вентиляторов изложены в работах [1,8,9,10,11,12,15]. При сравнении лучших отечественных аэродинамических схем радиальных вентиляторов Ц35-20 и Ц36-15 следует отметить, что первая имеет конический передний диск, 8 профильных лопаток плоско-выпуклых, вторая схема имеет конический или плоский передний диск, 6 выпукло-вогнутых лопаток, которые обеспечивают при эксплуатации лучшие прочностные показатели и соответственно повышенные частоты вращения роторов (до 125 м с^{-1}). Номинальные полные КПД вентиляторов, разработанных по схемам Ц35-20 и Ц36-15, составляют величины 0,89 и 0,87 соответственно.

Материалы аэродинамических исследований, направленные на определение максимальных величин полных, а, значит, и статических КПД радиальных вентиляторов и вентиляторных установок, позволили установить теоретическими и многочисленными экспериментальными исследованиями на моделях 176 аэродинамических схем вначале в Институте горного дела АН УССР им. М.М.Федорова, а позднее во ВНИИГМ им. М.М.Федорова наиболее экономичные модели вентиляторов, из которых были отобраны для дальнейшего проектирования шахтных установок главного проветривания только 5 схем вентиляторов – одностороннего и двустороннего

всасывания. В дальнейшем по проектам институтов «Донгипроуглемаш», «НИПКТИУглегормаш» и проектных институтов («Донгипрошахт», «Южгипрошахт», «Днепрогипрошахт» и др.) в промышленном производстве были внедрены свыше 10 типоразмеров радиальных вентиляторов и соответственно вентиляторных установок главного проветривания угольных шахт и рудников.

Выводы и направления дальнейших исследований.

1. Проведены исследования по определению наиболее совершенных аэродинамических форм профильных лопаток, при которых в рабочих колесах радиального типа реализуются максимальные значения экономичности в номинальном режиме полного и статического КПД вентилятора 0,87...0,89 и 0,85 соответственно, а это значит, что экономичность работы вентиляторов значительно повышается в рабочей зоне их эксплуатации в шахтных условиях. При этом достигается значительный положительный результат по энергоэффективности главных вентиляторных установок.

2. Высокие показатели по максимальному КПД рассмотренных аэродинамических схем радиальных вентиляторов, которые нашли широкое применение в шахтных вентиляторных установках главного проветривания, должны быть обеспечены (сохранены) при длительной эксплуатации вентилятора на шахтную сеть, что может быть достигнуто только за счет применения наиболее рационального выбора средств регулирования аэродинамических параметров вентилятора с применением регулируемого электропривода и осевых направляющих аппаратов (при углах установки лопаток ОНА в пределах $0...10^\circ$).

Литература

1. Вентиляторы шахтные главного проветривания. Технические условия: ГОСТ 11004. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 33 с.
2. Брук А.Д. Центробежные вентиляторы /А.Д.Брук, Т.И.Матикашвили, М.И.Невельсон и др.; Под ред. Т.С.Соломаховой. – М.: Машиностроение, 1975. – 416 с.
3. Центробежные вентиляторы ИГД АН УССР с профилированными лопатками / В.С.Пак, А.Г.Бабак // Вопросы горной механики. – 1961. – №7.– К.: Изд-во АН УССР, 1961. – С.10-24.
4. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: справочник / Т.С.Соломахова, К.В.Чебышева. – М.: Машиностроение, 1980. – 176 с.
5. Лившиц С.П. Высоконапорные дутьевые машины центробежного типа / С.П.Лившиц. – Л.: Машиностроение, 1976. – 296 с.
6. Аеродинамічні дослідження роботи моделей двобічних відцентрових вентиляторів Ц36-28, Ц38-23, Ц40-32 / В.О.Стешенко // Тези доповідей: республ. нарада молодих вчених України. – К.: АН УССР, 1966. – С.10-14.
7. Ковалевская В.И. Шахтные центробежные вентиляторы / В.И.Ковалевская, Г.А.Бабак, В.В.Пак. – М.: Недра, 1976. – 320 с.
8. Пак В.С. Новые шахтные центробежные вентиляторы главного проветривания ВЦН-1,6 и ВЦН-2,2 / В.С.Пак, Г.А.Бабак // Уголь Украины. – 1962. – №11. – С.37-39.
9. Бабак Г.А. Новый центробежный вентилятор ВЦД-32 / Г.А.Бабак, В.В.Пак, В.А.Стешенко //Уголь. – 1969. – № 1. – С.51-52.
10. Бабак Г.А. Шахтные установки с центробежными вентиляторами ВЦ-25 / Г.А.Бабак, Э.С.Мариновский, Н.М.Дятленко. – Донецк: Донбасс, 1969. – 36с.
11. Бабак Г.А. Промышленные испытания шахтной вентиляторной установки ВЦД-47У / Г.А.Бабак, В.А.Стешенко, В.И. Семидоцкий // Уголь Украины. – 1982. – №1. – С.27-28.
12. Носырев Б.А. Вентиляторные установки шахт и метрополитенов: учеб.пособие / Б.А.Носырев, С.В. Белов. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2000. – 278 с.
13. Экк Б. Новые вентиляторы с высоким КПД / Б.Экк. – М.: Углетехиздат, 1957. – 217 с.
14. Экк Б. Проектирование и эксплуатация центробежных и осевых вентиляторов/ Б.Экк. – М.: Госгортехиздат, 1959. – 566 с.
15. Бабак Г.А. Шахтные вентиляторные установки главного проветривания: Справочник / Г.А.Бабак, К.П.Бочаров, А.Т. Волохов и др. – М.: Недра, 1982.– 296 с.

*Статья рекомендована к публикации
канд. техн. наук Лободой В.В.*