



**О МОДЕРНИЗАЦИИ ВЫРАБОТАВШИХ РЕСУРС ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ
ВЕНТИЛЯТОРОВ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ**

А. М. Красюк, И. В. Лугин, П. В. Косых

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: krasuk@cn.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Выполнен анализ полей скоростей воздушного потока в подводящем канале главной вентиляторной установки с вентиляторами серии ВОД (аэродинамическая схема ОВ-84 ЦАГИ) и во входных элементах вентилятора. Показано, что на входе в вентилятор имеется значительная неравномерность потока, которая уменьшается по мере движения воздуха в проточной части вентилятора. Обоснован способ модернизации вентилятора путем замены двухступенчатого ротора на высоконагруженный одноступенчатый по схеме “входной направляющий аппарат – рабочее колесо – спрямляющий аппарат”, что позволяет достичь требуемой равномерности воздушного потока на входе в рабочее колесо, повысить ресурс работы подшипниковых опор ротора за счет значительного снижения его массы.

Вентилятор, рабочее колесо, вентиляционный канал, структура воздушных потоков

A METHOD FOR MODERNIZATION OF EXHAUSTED DOUBLE-STAGE MAIN FANS

A. M. Krasyyuk, I. V. Lugin, and P. V. Kosykh

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: krasuk@cn.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

Velocity field of air flow in the approach channel of main ventilation plant with fans of VOD series (aerodynamic scheme OV-84 TSAGI) and in the inlet unit was analyzed. It is shown, that there exists appreciable irregularity of flow in the inlet of fan, which decreases along the channel. Based on the analysis of velocity field of air flow, the method for the fan modernization, which consists in replacement of two-stage rotor by a high-pressure one-stage rotor made according to the scheme “inlet guide vanes – impeller – outlet directing vanes”, was justified. This allows to reach the performance objectives and increase the rotor bearing resource by considerably decreasing the weight of rotor.

Fan, impeller, ventilation channel, structure of air flow

Эксплуатация предприятий по добыче подземных месторождений полезных ископаемых, метрополитенов и транспортных тоннелей требует значительных объемов воздуха для обеспечения жизнедеятельности обслуживающего персонала и пассажиров [1, 2]. Вентиляторные установки угольных и рудных шахт потребляют примерно 1.5 % общего количества вырабатываемой в стране электроэнергии, в том числе вентиляторные установки угольных шахт — 1 %. На проветривание каждой шахты расходуется до 30 % всей расходуемой ею электроэнергии [3–5]. В себестоимости добытого полезного ископаемого затраты на вентиляцию могут достигать 20 % [4]. Для обеспечения подземных сооружений свежим воздухом используют вентиляторы главного проветривания (ВГП). Их производительность достигает 600 м³/с, а мощность приводных электродвигателей — 5000 кВт. ВГП являются дорогостоящим оборудованием,

поэтому сроки их эксплуатации составляют более 20 лет. В течение столь длительного времени узлы вентиляторов исчерпывают ресурс работы, поэтому необходимы профилактические и текущие ремонтные работы, которых с годами становится больше. Кроме того, с увеличением глубины шахт и повышением производительности добывающего оборудования растет потребность в количестве воздуха. При этом старые вентиляторы не могут обеспечить требуемую производительность. Большинство из устаревших осевых ВГП относятся к серийному ряду ВОД (вентилятор осевой двухступенчатый). В вентиляционных системах горнодобывающих предприятий и транспортных тоннелей, а также в воздухоподготовительных цехах металлургических комбинатов Российской Федерации находятся в эксплуатации более 50 вентиляторных установок с вентиляторами серии ВОД (рис. 1а). Их аэродинамические схемы разработаны в ЦАГИ в 1960-х годах прошлого века [6], а конструкции проектировались институтом Донгипроуглемаш в 1970-х годах. К началу XXI в. эти машины не только трехкратно выработали ресурс, но и морально устарели. Замена вентиляторов новыми требует значительных материальных вложений, так как необходимо не только заменить механическое оборудование и систему управления, но и частично изменить строительную часть главной вентиляторной установки: фундамент под новое оборудование, входные и выходные элементы и пр. В связи с этим становится актуальной задача модернизации устаревших вентиляторов.

Цель работы — обосновать способ модернизации парка шахтных двухступенчатых вентиляторов главного проветривания серии ВОД на основе анализа полей скоростей воздушного потока в подводящем канале главной вентиляторной установки (ГВУ) и во входных элементах ВГП.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическое моделирование структуры воздушных потоков во входных элементах главных вентиляторных установок проведено посредством уравнений Навье–Стокса и их решения методом конечных объемов в программном пакете ANSYS [7]. При обработке данных вычислительных экспериментов применялись методы математической статистики.

Один из путей модернизации вентиляторов состоит в замене только тех узлов, которые изнашивались в процессе эксплуатации или не соответствуют современным требованиям без замены узлов и деталей, которые сохранили работоспособность (корпус вентилятора, кок, коллектор, диффузор, систему смазки и т. п.). При этом полностью сохраняется строительная часть ГВУ, включая фундаменты, и сокращаются сроки модернизации.

За последние 30 лет в шахтном вентиляторостроении произошел ряд существенных изменений, которые обусловлены развитием методов вычислительной аэродинамики. Разработаны новые аэродинамические схемы, обеспечивающие создание высоконагруженных осевых вентиляторов главного проветривания, и созданы одноступенчатые машины с аэродинамическими параметрами, доступными ранее только в двухступенчатом исполнении [8]. В основном это достигнуто за счет увеличения скорости вращения рабочих колес (РК).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ВХОДЕ В ВЕНТИЛЯТОР

Рассмотрим влияние реально существующей конструкции элементов вентиляционного тракта на поле скоростей воздушного потока во входном сечении вентилятора. Сравним полученные результаты с результатами моделирования течения воздуха в конструкции элементов вентиляционного тракта, рекомендованной ЦАГИ [6] и принятой за базовый вариант.

Исследования проводились на примере типовой конструкции главной вентиляторной установки ВОД-30 (рис. 1а) одной из шахт ОАО “СУЭК”. В качестве исходных данных использовалась 3D модель вентиляционного канала 9 в виде поверхностной сетки в формате *.igs, полученной в результате объемного сканирования.

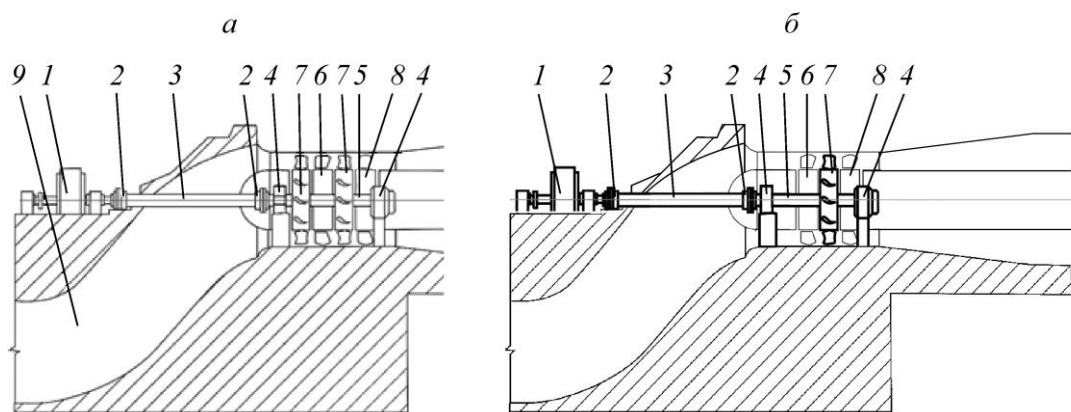


Рис. 1. Схема главной вентиляторной установки: *а* — с вентиляторами серии ВОД; *б* — схема модернизации вентилятора ВОД-30; 1 — двигатель; 2 — муфта; 3 — трансмиссионный вал; 4 — опора; 5 — вал вентилятора; 6 — спрямляющий аппарат первой ступени; 7 — рабочее колесо; 8 — спрямляющий аппарат второй ступени; 9 — вентиляционный канал

На 3D-модели с присоединенными элементами вентилятора ВОД-30 изучалось движение воздуха (рис. 2) через элементы ГВУ. Анализ линий тока позволил выявить особенность течения при данной компоновке вентиляционной камеры — образование паразитного вихря после кольцевого диффузора вентилятора, что приводит к дополнительным непроизводительным потерям давления в ГВУ. При этом на входе в вентилятор течение неравномерное, но не содержит значительных вихрей.

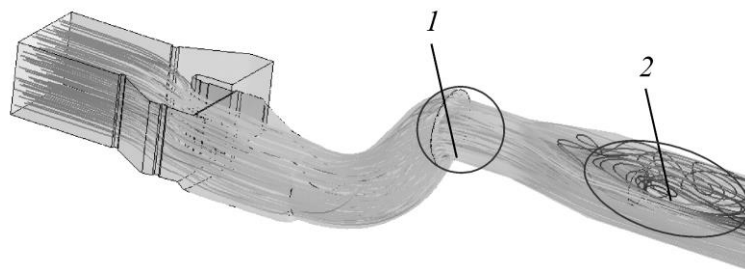


Рис. 2. Линии тока в элементах входа в вентилятор ГВУ: 1 — область неравномерности; 2 — зона вихря

Для сравнения рассмотрено движение воздушного потока в вентиляционном канале “утка” и входных элементах вентилятора, конструкции которых рекомендованы разработчиками схемы ЦАГИ ОВ-84 [6]. При дальнейшем эту конструкцию примем за базовый вариант. Для такой конструкции входа разработана 3D-модель и выполнены аэродинамические исследования движения воздуха по аналогии с реальной конструкцией.

Для анализа неравномерности поля скоростей воздушного потока в обеих моделях выделены несколько характерных сечений (рис. 3). В качестве характерных выбраны сечения на различных расстояниях от входа в коллектор: 1 — вход в коллектор (расстояние 0 м); 2 — перед входом в первое рабочее колесо К1 (расстояние 0.6 м); 3 — вход в рабочее колесо К1 (расстояние 1.2 м); 4 — вход в спрямляюще-направляющий аппарат (СНА) (расстояние 1.7 м); 5 — вход в рабочее колесо К2 (расстояние 2.4 м); 6 — вход в спрямляющий аппарат (СА) (расстояние 2.9 м); 7 — выход из СА (расстояние 3.6 м).

Поля скоростей в сечениях 3, 5, 7 для базовой и реальной конструкций приведены к одному диапазону скоростей. В соответствии с рис. 3 неравномерность поля скоростей в реальной конструкции существенно уменьшается по мере движения воздуха по проточной части вентилятора, т. е. с увеличением расстояния от его входа.

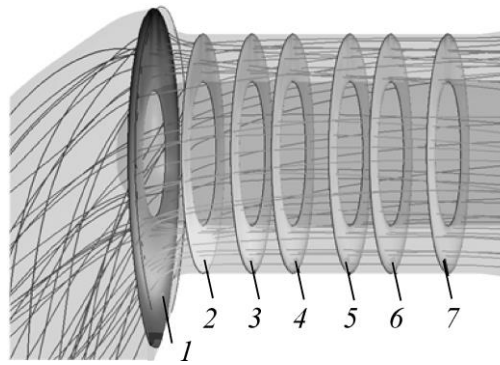


Рис. 3. Характерные сечения в вентиляторе 1–7

Для численной оценки неравномерности взят коэффициент, описывающий отношение максимальной скорости воздуха в сечении к средней скорости потока. Значение этого коэффициента в идеально равномерном потоке равно единице, в реальных условиях при прямом входе в вентилятор (в прямоточном канале) составляет 1.03–1.06. В таблице представлены значения коэффициента неравномерности для характерных сечений.

Коэффициент неравномерности

Сечение	1 вход в коллектор	2 перед K1	3 вход в K1	4 вход в СНА	5 вход в K2	6 вход в СА	7 выход из СА
Расстояние от начала коллектора, м	0	0.60	1.20	1.7	2.4	2.90	3.60
Коэффициент неравномерности (базовая конструкция)	1.49	1.28	1.20	1.17	1.14	1.13	1.13
Коэффициент неравномерности (базовая конструкция)	1.56	1.17	1.12	1.13	1.13	1.13	1.14

Видно, что неравномерность на входе в коллектор при реальной конструкции вентиляционного канала имеет значение 1.49, которое быстро уменьшается с удалением от входа в вентилятор. Причем в базовой конструкции неравномерность уменьшается значительно быстрее и достигает допустимых значений уже к сечению 3 входа в K1. Начиная с сечения 5 (вход в рабочее колесо K2, расстояние 2.4 м от входа в коллектор), неравномерность снижается до 1.14 и далее до выхода из спрямляющего аппарата сохраняет практически постоянное значение, коэффициенты неравномерности реальной и базовой конструкции практически совпадают. Значение неравномерности 1.14 несущественно отличается от неравномерности базовой конструкции, а следовательно, незначительно влияет на аэродинамические параметры вентилятора. Следует отметить, что на входе в K1 (сечение 3) эксплуатируемого вентилятора ВОД-30 с базовой конструкцией входных элементов коэффициент неравномерности составляет 1.20, поэтому его аэродинамическая характеристика не соответствует заводской.

Исследования показывают, что модернизацию вентиляторов серии ВОД следует осуществлять путем замены аэродинамической схемы K1 + СА + K2 + СА на схему ВНА + K + СА, т. е. исключением из схемы первого рабочего колеса K1, ближайшего ко входу в вентилятор, где ВНА — входной направляющий аппарат. Это позволит избежать негативного влияния неравномерности на аэродинамические параметры РК, вызванные погрешностями изготовления подводящего канала от базового. Это обусловлено тем, что воздушный поток, двигаясь по проточной части вентилятора до рабочего колеса K2, успевает снизить неравномерность поля скоростей до требуемых значений.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВЕНТИЛЯТОРА

Способ модернизации вентилятора серии ВОД путем снятия первого рабочего колеса иллюстрирует рис. 1б на примере ВГП ВОД-30 с частотой вращения 500 об/мин. Жирными линиями выделены узлы, которые заменяются на новые. Аэродинамические параметры после модернизации: производительность — $143.2 \text{ м}^3/\text{с}$, статическое давление — 3160 Па. Если диаметр диффузора на выходе 4.3 м, динамическое давление составляет 85.8 Па при заданном расходе, следовательно, полное давление вентилятора с учетом приблизительного коэффициента местных потерь в диффузоре 1.25–1.30 — около 3320 Па.

Исследования выполнялись с использованием режима расчета турбомашин модуля CFX программно-расчетного комплекса ANSYS. Геометрические параметры лопаток рабочего колеса К1 и К2 выбраны в соответствии со схемой ОВ-84 ЦАГИ в количестве 12 шт. на каждом колесе, лопатки СА первой и второй ступени с учетом реверсивности вентилятора — по аэродинамической схеме С-54 ЦАГИ в количестве 14 шт. [6]. Базовый угол установки лопаток (УУЛ) К1 и К2 равен 35° . Размеры диффузора приняты согласно типовым чертежам.

На первом этапе сравнивались аэродинамические параметры одноступенчатой схемы ВНА + К + СА и регулировкой УУЛ ВНА с базовой двухступенчатой схемой К1 + СА + К2 + СА при одинаковой частоте вращения 600 об/мин (окружная скорость по концам лопаток 94 м/с). Это было обусловлено тем, что спрямляющий аппарат С-54 планируется использовать в модернизированном вентиляторе в качестве входного направляющего аппарата.

Снятие первой ступени К1 с сохранением УУЛ СА 70° , который теперь служит ВНА, приводит к резкому снижению аэродинамических параметров вентилятора (рис. 4, кривая 3), так как ВНА закручивает поток по направлению вращения К2, а не против него. Поэтому угол установки лопаток входного направляющего аппарата оптимизировался по критерию полного давления, равного 3320 Па, при расходе $143.2 \text{ м}^3/\text{с}$ с достижением максимального КПД при частоте вращения 600 об/мин. В результате серии вычислительных экспериментов определен УУЛ ВНА, который составил 100.6° . По графику 4 на рис. 4 видно, что аэродинамические параметры удовлетворяют требуемым, но рабочая точка находится вблизи зоны неустойчивой работы вентилятора. Отсюда можно сделать вывод, что применение одноступенчатой схемы с регулированием УУЛ ВНА эффективно, но для обеспечения устойчивости следует изменить геометрию профиля лопаток рабочего колеса К2. Потребовалось разработать профиль лопатки, имеющий запас по давлению не ниже 5 %, что и было сделано. В ходе вычислительного эксперимента получены аэродинамические характеристики модернизированного вентилятора с рабочей лопаткой, имеющей новый профиль (кривая 5) полностью удовлетворяющий требуемому расходу и давлению.

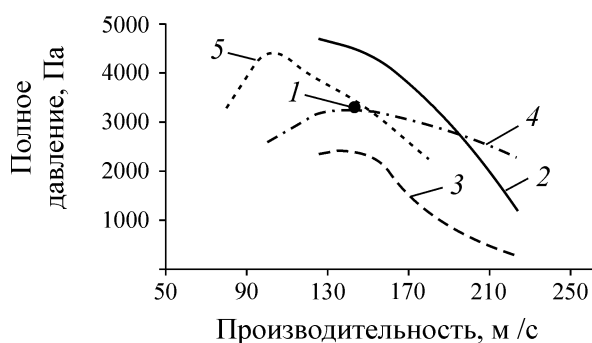


Рис. 4. Аэродинамические параметры вентилятора ВОД-30 при изменении аэродинамической схемы: 1 — расчетная рабочая точка вентилятора (требуемые параметры); 2 — заводская схема К1 + СА + К2 + СА, УУЛ К1 и К2 35° , 600 об/мин; 3 — схема без К1, ВНА + К2 + СА, УУЛ К2 35° , ВНА 70° , 600 об/мин; 4 — схема с оптимизированным УУЛ ВНА 100.6° , ВНА + К2 + СА, 600 об/мин; 5 — новая схема ВНА + К1 + СА, 750 об/мин

Таким образом, разработана методика расчета и выбора аэродинамических параметров шахтных осевых вентиляторов для их модернизации. Обоснован способ модернизации осевых вентиляторов главного проветривания серии ВОД (аэродинамическая схема ОВ-84 ЦАГИ) путем перехода от аэродинамической схемы $K1 + CA + K2 + CA$ к схеме $BHA + K + CA$ и замены двухступенчатого ротора на высоконагруженный одноступенчатый, что позволяет повысить равномерность воздушного потока на входе в рабочее колесо и увеличить ресурс работы подшипниковых опор ротора за счет значительного снижения его массы.

ВЫВОДЫ

Повышение эффективности главных вентиляторных установок шахт, оборудованных вентиляторами серии ВОД, многократно выработавших ресурс, достигается модернизацией роторной группы. Обоснован способ модернизации двухступенчатых осевых вентиляторов ВОД (аэродинамическая схема ОВ-84 ЦАГИ), включающих рабочее колесо и спрямляющий аппарат в каждой ступени, путем замены двухступенчатого ротора на высоконагруженный одноступенчатый, выполненный по схеме “входной направляющий аппарат – рабочее колесо – спрямляющий аппарат”, что дает возможность достичь требуемой равномерности воздушного потока на входе в рабочее колесо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Krasyuk A. M.** Tunnel ventilation of the underground, Novosibirsk, Nauka, 2006, 164 pp. (in Russian) [Красюк А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов. — Новосибирск: Наука, 2006. — 164 с.]
2. **Gendler S. G.** Problems of transport tunnel ventilation, Mining Information Analytical Bulletin, Thematic application. Security, 2005, pp. 281–1295 (in Russian) [Гендлер С. Г. Проблемы проветривания транспортных тоннелей // ГИАБ. — Тематическое приложение. Безопасность. — 2005. — С. 281–295.]
3. **Klimov A. A.** Estimate of system ventilation efficiency in mines near Moscow basin, Synopsis of Cand. Tech. Sci. Thesis, Tula state university, 2000 (in Russian) [Климов А. А. Оценка эффективности системы вентиляции шахт Подмосковского бассейна: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тула: ТГУ, 2000.]
4. **Ivanov S. K. and Kiklevich Y. N.** Axial high-pressure fans provide energy- and material supply, All-Ukrainian Science-Technical Journal, 2004, no. 4, pp. 15–17 (in Russian) [Иванов С. К., Киклевич Ю. Н. Осевые высоконапорные вентиляторы обеспечивают энерго- и материалоснабжение // Всеукраин. науч.-техн. журн. — 2004. — № 4. — С. 15–17.]
5. **Prokofiev V. P.** Ways of increase efficiency main ventilation plant in mines of non-ferrous metallurgy, Mining Journal, 1961, no. 3, pp. 25–30 (in Russian) [Прокофьев В. П. Пути увеличения экономичности главных вентиляторных установок на рудниках цветной металлургии // Горн. журнал. — 1961. — № 3. — С. 25–30.]
6. **Brusilovsky I. V.** Aerodynamic schemes and characteristics of TSAGI axial fans, Moscow, Nedra, 1978, 198 pp. [Брусиловский И. В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. — М.: Недра, 1978. — 198 с.]
7. **ANSYS Inc**, 2013. ANSYS Fluent. 15th ed., Canonsbury, PA.
8. **Krasyuk A. M., Kosykh P. V., and Ruskiy E. Y.** On influence of frequency adjustable drive on bend vibrations of mine fan rotor, Fundamental and Applied Mining Science, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 23–27 (in Russian) [Красюк А. М., Косых П. В., Русский Е. Ю. О влиянии частотно регулируемого электропривода на изгибные колебания ротора шахтного вентилятора // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 5. — № 2. — С. 23–27.]