

## РУНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.4

### АДАПТАЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАВНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ К ИЗМЕНЕНИЯМ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ШАХТ

**Н. Н. Петров, Н. В. Панова, Е. Ю. Грехнёва**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрена эффективность адаптации аэродинамических характеристик главных вентиляторов к изменяющимся вентиляционным режимам за срок службы шахт путем использования вентиляторов ВО со сменными листовыми лопатками рабочего колеса, выполненными по разным аэродинамическим схемам.

*Рабочее колесо, лопатки, адаптация, требуемые давления и производительность, КПД вентиляторов*

**Сущность эволюции вентиляционных параметров шахт.** Вентиляционные системы угольных и рудных шахт представлены сотнями, а иногда и тысячами соединенных между собой сложным образом горных выработок, десятками вспомогательных и несколькими главными вентиляторными установками (ГВУ), работающими на данную сеть горных выработок. Вентиляционные системы — это множество технико-экономических параметров, однако основными из них являются заданный расход воздуха в шахту  $Q_3(t)$  и давление вентилятора. Эти параметры под действием ряда случайных факторов непрерывно изменяются.

Практика проектирования шахт и их вентиляционных систем исходит из того, что указанные параметры за срок службы вентиляторной установки (15–20 лет) изменяются несущественно или в пределах, характеризующихся тремя фиксированными состояниями: сдача в эксплуатацию, освоение проектной мощности шахты, наибольшее удаление фронта горных работ.

Для снижения эксплуатационных затрат на ГВУ желательно, чтобы режим работы в координатах “давление–производительность” был как можно ближе к точке максимального КПД установленного вентилятора.

Площади возможных режимов при работе традиционных вентиляторов с высоким статическим КПД весьма ограничены. Следовательно, чтобы обеспечить соответствие данной ГВУ требованиям вентиляционной системы за срок службы установки или шахты (40–50 лет) необ-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № 14.В37.21.0333).

ходима высокая достоверность прогноза будущих вентиляционных режимов, что при использовании существующих методов невозможно выполнить с высокой достоверностью. В зарубежной практике проектирования известны случаи, когда прогноз будущих вентиляционных режимов задается не тремя, а несколькими десятками точек.

Изучение состояния проветривания шахт Донбасса и Кузбасса показывает, что нет случаев работы вентиляторов с максимальными статическими КПД, а большая часть установок (до 70 %) не может обеспечить развития горных работ и расширения производства [1, 2].

**Физическая сущность и причины эволюции вентиляционных систем.** Остановимся на первопричинах, вызывающих изменение требуемых расходов воздуха. Для выявления истоков эволюции обратимся к исходным формулам определения необходимого количества воздуха  $Q_z(t)$  для проветривания шахты.

Требуемый расход воздуха для проветривания шахты определяется как

$$Q_z(t) = K_n \left[ \left( K_p \sum_1^n Q_{yч}(t) + \sum_1^m Q_{под}(t) \right) K + \sum_1^k Q_k(t) + \sum_1^u Q_{ут}(t) \right], \quad (1)$$

где  $Q_{yч}(t)$ ,  $Q_{под}(t)$ ,  $Q_k(t)$ ,  $Q_{ут}(t)$  — расчетные требуемые расходы воздуха для проветривания соответственно выемочных участков, подготовительных выработок, камер и утечки как значения некоторых функций в фиксированные моменты времени,  $m^3 \cdot c^{-1}$ ;  $n$ ,  $m$ ,  $k$ ,  $u$  — количество выемочных участков, подготовительных забоев, камер и сосредоточенных мест утечки воздуха;  $K_n$ ,  $K_p$ ,  $K$  — коэффициенты запаса воздуха, учитывающие соответственно неравномерность распределения воздуха по выработкам, необходимость резерва воздуха на случай увеличения объема добычи и на случай проветривания выработок за пределами выемочного участка.

Рекомендуемые значения указанных коэффициентов:  $K_n = 1.1 - 1.2$ ,  $K_p = 1.15$ ,  $K = 1.15 - 1.65$ .

Если не удастся дифференцировать подземные утечки воздуха, то общий данный расход воздуха для фиксированного момента времени вычисляется как

$$Q_z(t) = K_n \left[ \left( K_p \sum_1^n Q_{yч}(t) + \sum_1^m Q_{под}(t) \right) K + \sum_1^k Q_k(t) \right]. \quad (2)$$

Количество воздуха для проветривания выемочного участка

$$Q_{yч}(t) = K_1 Q_{заб}(t) + \sum_1^n Q_{нар}(t) + \sum_1^u Q'_{ут}(t), \quad (3)$$

где  $Q_{заб}(t)$ ,  $Q_{нар}(t)$ ,  $Q'_{ут}(t)$  — расчетные значения требуемых расходов воздуха для проветривания очистного забоя, нарезных и подготовительных забоев в пределах участка и утечек воздуха;  $n$  — количество нарезных подготовительных забоев;  $u$  — число мест утечек;  $K_1$  — коэффициент доставки воздуха в забой,  $K_1 = 1.2 - 2.0$ .

Для газовых шахт потребность в проветривании очистных забоев является определяющей, и общешахтное заданное количество воздуха через приведенные численные значения коэффициентов запаса (резерва, доставки и т. д.)

$$Q_z(t) \cong K_0 \sum_1^n Q_{заб}(t), \quad K_0 = 1.85 - 4.58. \quad (4)$$

Потребность в воздухе для проветривания отдельных забоев и выработок, например по фактору метановыделения, следующая:

— для обособленно проветриваемых горных выработок

$$Q_{\text{заб}}(t) = \frac{0.028gA(t)N}{C}, \quad (5)$$

— для механизированных очистных забоев

$$Q_{\text{заб}}(t) = \frac{P_{\text{max}}(x_0 - x_1)}{60\varphi} + g_{\text{в.п}}(t) \frac{A(t) \cdot 10^{-3}}{8.64}, \quad (6)$$

— для щитовых забоев

$$Q_{\text{заб}}(t) = \frac{1.67J(t)N}{C - C_0}, \quad (7)$$

где  $g$  — средняя относительная метанообильность очистного забоя,  $\text{м}^3 \cdot \text{т}^{-1}$ ;  $g_{\text{в.п}}$  — относительная метанообильность выработанного пространства,  $\text{м}^3 \cdot \text{т}^{-1}$ ;  $A(t)$  — производительность очистного забоя,  $\text{т} \cdot \text{ч}^{-1}$ ;  $P_{\text{max}}$  — максимальная производительность очистной машины,  $\text{т} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $C, C_0$  — допустимые концентрации во входящей и исходящей струе, %;  $x_0, x_1$  — природная и остаточная газоносность разрабатываемого пласта,  $\text{м}^3 \cdot \text{т}^{-1}$ ;  $N$  — коэффициент неравномерности метановыделения (1.3–2.4);  $J(t)$  — метановыделение на призабойном участке,  $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ .

Из соотношений (1)–(7) следует, что необходимый расход воздуха для проветривания шахты  $Q_3(t)$  зависит от множества горно-геологических и технических параметров производства работ и организационных факторов и в общем случае является некоторой функцией многих переменных:

$$Q_3(t) = f(g, g_0, A, P_{\text{max}}, C, x, x_0, J, N, K). \quad (8)$$

Особенностями функций (8) являются:

- вероятностный характер текущих значений ее аргументов (случайные функции времени);
- широкие колебания численных значений ее аргументов даже в пределах отработки одного шахтопласта (месторождения);
- функциональная или случайная зависимость между аргументами и зависимость аргументов от организационно-технических факторов ведения горных работ.

Следовательно, функцию  $Q_3(t)$  прогнозировать затруднительно.

**Закономерности эволюции вентиляционных систем на примерах шахт Кузнецкого и Карагандинского бассейнов.** В оценках приводятся предельно возможные отклонения параметров вентиляционных систем за срок службы вентиляторной установки.

Комплексными проектами предусматривается реконструкция (объединение) существующих и строительство новых шахт. В указанных проектах даны ориентировочные оценки потребности в вентиляционных режимах и определены вентиляторные установки, которые должны быть построены до 1995 г.

Можно ожидать, что как существующие, так и вновь создаваемые вентиляторные установки будут подвержены действию известного множества эволюционирующих факторов, следовательно, их параметры в значительной мере изменятся.

Из анализа статического материала очевидна неправомерность существующей методики проектирования вентиляционных систем и выбора вентиляторов для ГВУ. Например, если считать изменение параметров вентиляционной системы какой-либо шахты Кузбасса в 1972 г. совпадающим со средними характеристиками эволюции по бассейну (как наиболее вероятными), то из статистических данных [1, 2] можно заключить, что необходимая производитель-

ность ее вентиляторной установки возрастала на 0.9 % в квартал ( $\bar{V}_Q = 1.009$ ) или на 3.8 % в год ( $\bar{V}_Q = (V_Q)^4 = 1.038$ ). Следовательно, резерв выбранного вентилятора (10 %) будет исчерпан менее чем за 3 года, и недостаточная гидравлическая мощность вентиляторной установки будет сдерживать развитие горных работ.

Параметры вентиляционных систем непрерывно изменяются, что часто приводит к выходу режимов работающих вентиляторов на границы их возможного использования и далеко за пределы, означенные в первоначальном проекте по выбору вентиляторов.

Непрерывная эволюция вентиляционных параметров шахт приводит к тому, что вентиляторы главных вентиляторных установок работают с низкими технико-экономическими показателями ( $\eta_{ст} < 0.6$ ), а выход режима на границу возможностей установленного вентилятора сдерживает развитие объемов производства и обуславливает необходимость строительства новой вентиляторной установки и реконструкции всей вентиляционной системы.

Для экономичности работы вентиляторных установок и их соответствия требованиям вентиляционной системы должны быть повышены адаптивные свойства главных вентиляторов как по производительности, так и по создаваемому давлению. К сожалению, этому вопросу не отдается должного внимания.

Очень важными, на наш взгляд, являются задачи разработки методов прогнозирования развития вентиляционных систем шахт и рудников за время их службы и расчета требуемых параметров проветривания. Фактические вентиляционные режимы шахт и рудников, как правило, не соответствует проектам, что приводит к низкой экономичности и эффективности вентиляционных комплексов и необходимости периодических реконструкций вентиляции, которые сдерживают ведение горных работ и затрудняют организацию безопасных условий труда.

**Состояние работ и оценка известных методов адаптации характеристик вентилятора.** Институтами ИГД и ИГиЛ СО РАН совместно с Институтом “АЭРОТУРБОМАШ” разработаны методы численного проектирования аэродинамических схем по их безразмерным характеристикам путем задания расчетных режимов на поле требуемых параметров проветривания. В результате созданы совершенные аэродинамические схемы осевых вентиляторов, имеющие в установке номинальные статические КПД до 0.83. Характерные изменения требуемой производительности вентилятора, как показывают исследования статистического материала, могут превзойти трехкратное значение исходной производительности. С использованием новых аэродинамических схем разработан ряд вентиляторов серии ВО со сдвоенными листовыми поворотными на ходу лопатками рабочего колеса (РК), имеющими повышенные эксплуатационные, в том числе адаптивные, характеристики по сравнению с известными вентиляторами [3]. Указанный ряд вентиляторов с диаметром РК 2100–5000 мм (рис. 1) обеспечивает поле вентиляционных режимов по давлению от 100 до 550 даПа, по производительности от 35 до 700 м<sup>3</sup>/с и более при окружных скоростях по концам лопаток до 120 м/с. При этом машины с диаметром РК 2100 и 2400 мм работают на ряде шахт и рудников.

Компоновка вентиляторных агрегатов данного ряда машин представлена на рис. 1, их реверсирование осуществляется на ходу без изменения направления вращения ротора путем поворота лопаток рабочего колеса на угол до 135° (т. е. на 120° от минимального), при этом вентилятор может обеспечить 85–90 % производительности прямого режима за 1.5–3.0 мин.

Вентиляторы содержат электромеханический привод с реечным механизмом поворота каждой лопатки, позволяющий оператору при отказе электрооборудования автоматики выполнить реверсирование вентилятора вручную за 60–90 с.

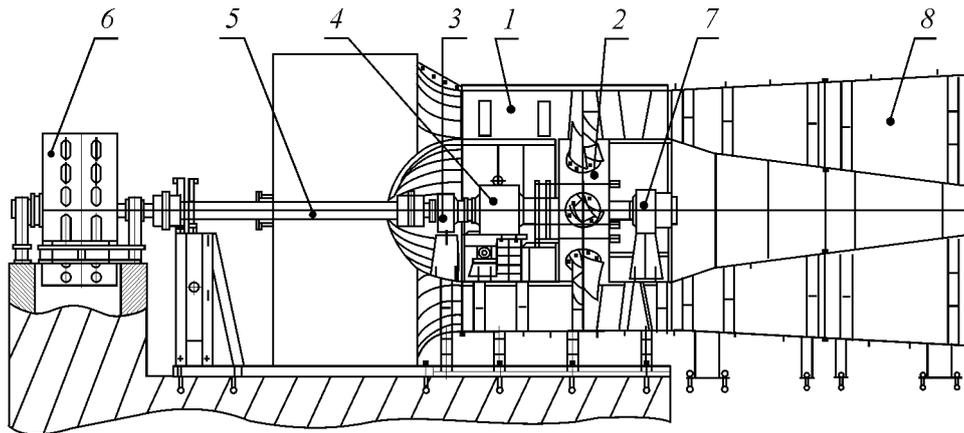


Рис. 1. Компонновка вентиляторных агрегатов ряда осевых вентиляторов серии ВО: 1 — вентилятор; 2 — рабочее колесо со съемными листовыми лопатками; 3 — радиальная подшипниковая опора; 4 — механизм поворота лопаток РК; 5 — трансмиссионный вал; 6 — синхронный (асинхронный) электродвигатель; 7 — радиально-упорная подшипниковая опора; 8 — диффузор

В качестве примера сравнительной эффективности вентиляторов серии ВО можно привести результаты тендера для одной из шахт Кузбасса в 2011 г. на поставку вентиляторов на расчетные режимы работы по периодам эксплуатации, по давлению 227–250 даПа и производительности 396–622 м<sup>3</sup>/с с требованием максимально допустимого диаметра РК до 6000 мм. Рядом фирм были предложены следующие варианты машин (таблица).

Параметр вентилятора	Тип вентилятора и фирма поставщика				
	HOWDEN	TLT	ZITRON	ВЕНТИПОМ	ВО
<i>D</i> , мм	4750	4420	4500	4200	4300
Частота вращения, об/мин	595	745	600	600	500
Окружная скорость, м/с	148	172	141	132	112

Предложенные фирмами вентиляторы имеют повышенные окружные скорости вращения от 132 до 172 м/с. Вентилятор ВО-43К обеспечивает указанные эксплуатационные параметры при существенно меньшей окружной скорости вращения по концам лопаток (до 112 м/с) за счет более эффективной аэродинамики рабочего колеса. Вентиляторы этой серии имеют показатели по давлению и производительности выше, чем зарубежные аналоги. Преимущества вентиляторов серии ВО: существенно меньшая стоимость оборудования и строительно-технологической части главных вентиляторных установок; повышенная реверсивность и регулировочные характеристики вентиляторов; резерв повышения возможных параметров работы путем увеличения окружных скоростей вращения по концам лопаток до 160 м/с и т. п.

В качестве типовых аэродинамических схем машин серии ВО (см. рис. 1) рассмотрим аэродинамические характеристики вентилятора типа ВО-30К, который может оснащаться высоконапорными (1) или высокорасходными (2) лопаточными системами (рис. 2).

Расширение экономической работы в аэродинамической области, т. е. адаптивности вентиляторов, обеспечивается путем оснащения их сменными листовыми, поворотными на ходу лопатками рабочего колеса, изготовленными по разным геометриям высоконапорной, высокорасходной или промежуточной аэродинамическим схемам (характеристикам), а также возможно-

стью их использования с 8 или 4 лопатками (рис. 2) [3, 4]. Это позволяет при замене лопаток, выполненных по высокорасходной схеме (2), на лопатки, выполненные по высоконапорной схеме (1), например при работе на сети с ростом сопротивления от  $R_1$  до  $R_3$  увеличить давление вентилятора в 2 раза и производительность соответственно в 1.7 раза при работе со статическим  $\eta \geq 0.75$ . На рис. 2 также видно, что при снятии 4 лопаток с использованием высокорасходной схемы и работе на сеть  $R_2$  давление вентилятора снизится в 0.5 раза.

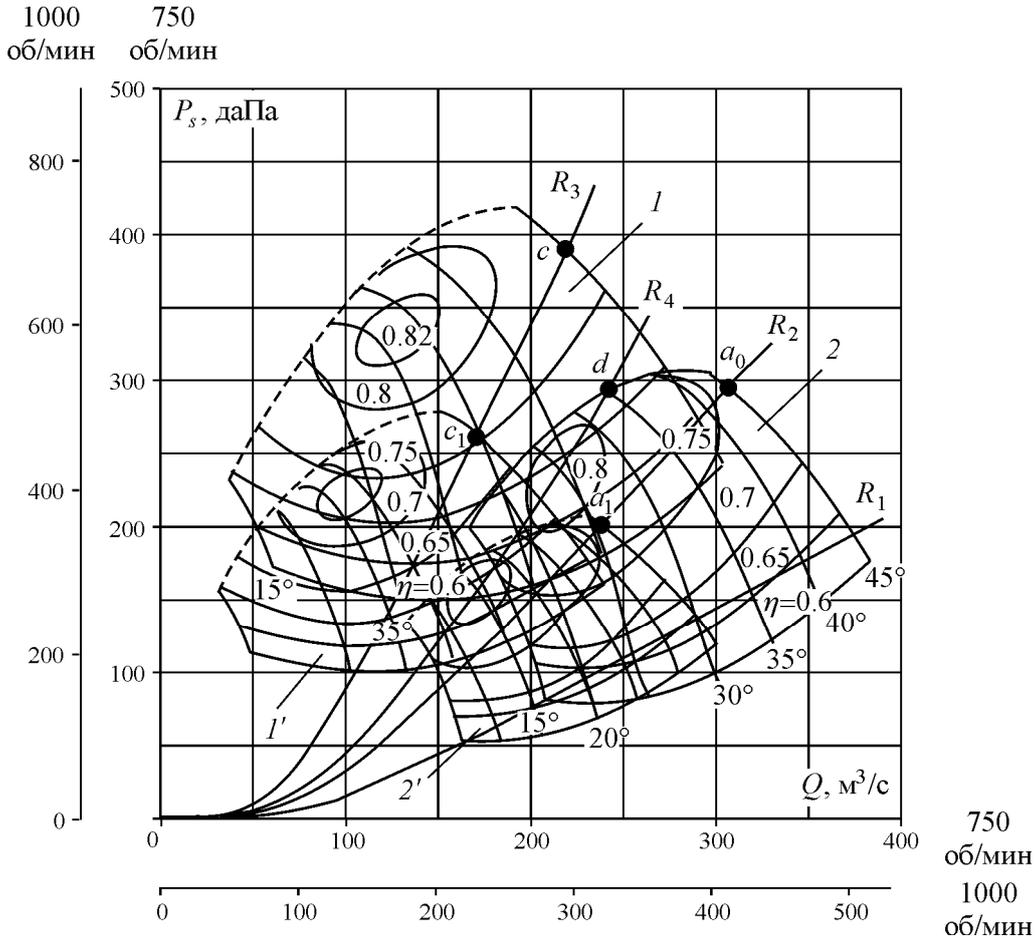


Рис. 2. Аэродинамические характеристики вентилятора ВО-30К, оснащенного высоконапорной 1 или высокорасходной 2 схемой с числом лопаток рабочего колеса 8 (1, 2) и 4 (1', 2')

В качестве примера адаптации режима вентилятора рассмотрим изменение параметров проветривания при изменении сопротивления вентиляционной сети (рис. 2), где представлены варианты: 1 — при росте сопротивления вентиляционной сети от  $R_2$  до  $R_3$  при изменении режима из точки  $a$  в точке  $d$  необходимо заменить лопатки АМ-19А (высокорасходные) на лопатки АМ-17А (высоконапорные); 2 — при снижении требуемых вентиляционных параметров при неизменном сопротивлении вентиляционной сети, например  $R_2$ , из точки  $a$  в точке  $a_1$  необходимо снять половину лопаток РК (с  $z = 8$  до  $z = 4$ ).

В результате выполняется надежное обеспечение вентиляционных режимов в условиях широких колебаний параметров проветривания шахты и работа вентилятора за срок службы установки с КПД  $\eta \geq 0.75$ .

Процедура замены лопаточного узла на узел с другими аэродинамическими характеристиками (с целью повышения давления и (или) производительности вентилятора и установки) упрощена путем крепления съемной части к базовой посредством специального болтового соединения (рис. 3), что позволяет провести указанные операции в течение одной рабочей смены.

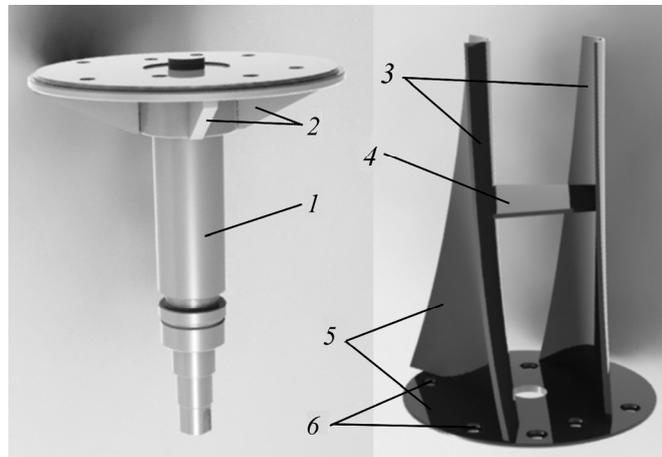


Рис. 3. Адаптивный лопаточный узел: 1 — базовая часть (поворотное основание с хвостовиком лопатки); 2 — ребра жесткости; 3 — лопасти; 4 — перемычка, 5 — съемная часть; 6 — отверстия под болтовые соединения

При увеличении окружных скоростей вращения наблюдается рост действующих нагрузок на лопасти, корпус РК и ротор вентилятора в целом. Поэтому одной из основных задач при проектировании таких машин стало проведение исследований динамики и прочности основных узлов роторов высоконагруженных вентиляторов [5].

Надежность лопаточного узла обеспечивается достаточным запасом статической прочности и предотвращением резонансных явлений, обусловленных нестационарностью внешних воздействий, в качестве которых рассматриваются частота вращения ротора и возмущения воздушного потока.

### ВЫВОДЫ

Шахтные осевые вентиляторы, в том числе известных фирм (см. таблицу), из-за недостаточных адаптивных свойств и регулировочных характеристик работают с низким эксплуатационным КПД (в пределах 0.38–0.62); часто после нескольких лет работы не могут обеспечить требуемый изменившийся вентиляционный режим; имеют дорогостоящую строительнотехнологическую часть и ненадежны при многоступенчатом исполнении и высокой густоте лопаток рабочих колес.

Оснащение осевых вентиляторов серии ВО съемными сдвоенными листовыми лопатками, выполненными по разным аэродинамическим схемам, позволяет в несколько раз расширить поле их возможных режимов и работу вентилятора на установке за срок службы шахты с высоким эксплуатационным КПД  $\eta \geq 0.75$ .

Конструктивное выполнение лопаток рабочего колеса осевых вентиляторов со съемной частью кардинально повышает их адаптивные свойства и существенно увеличивает надежность обеспечения проветривания шахт посредством создаваемых в начале строительства главных вентиляторных установок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петров Н. Н., Кайгородов Ю. М.** Исследование эволюции шахтных вентиляционных систем / Автоматическое управление в горном деле. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1974.
2. **Бабак Г. А., Король Е. П.** Динамика вентиляционных режимов шахтных вентиляторных установок главного проветривания / Шахтные турбомашини: сб. трудов ИГМ и ТК им. М. М. Федорова. — Донецк, 1972.
3. **Петров Н. Н., Попов Н. А., Батяев В. А. и др.** Теория и проектирование реверсивных осевых вентиляторов с поворотными на ходу лопатками рабочего колеса // ФТПРПИ. — 1999. — № 5.
4. **Петров Н. Н., Кузнецов А. С.** К вопросу выбора оборудования для главных вентиляторных установок шахт / Управление вентиляцией и газодинамическими явлениями в шахтах. — Новосибирск, 1977.
5. **Петров Н. Н., Панова Н. В.** Оценка прочности адаптивного лопаточного узла высоконагруженных шахтных осевых вентиляторов // ФТПРПИ. — 2013. — № 1.

*Поступила в редакцию 14/VIII 2013*