

УДК 621.634

doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.15

Н. И. ГРИЦЕНКО, В. Н. ГОЛОЩАПОВ**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА НА СОЗДАВАЕМЫЙ ИМ ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ**

АННОТАЦИЯ В статье представлены численные и экспериментальные исследования влияния формы проточной части осевого вентилятора на создаваемый перепад давлений. Исследованы конические, цилиндрические, цилиндрико-конические, сфероконические и другие типы форм проточной части. Определены предельные уровни перепада давлений при условии сохранения высокого коэффициента полезного действия для осевых шахтных вентиляторов местного проветривания серийного производства. Даны рекомендации по применению отдельных типов форм проточной части для крупных осевых вентиляторов большой производительности с целью снижения металлоёмкости и повышению эффективности в широких пределах режимов работы.

Ключевые слова: вентилятор, проточная часть, меридиональное ускорение, втулка, давление.

N. GRYTSENKO, V. GOLOSHCHAPOV**INFLUENCE OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE FLOW PASS OF AXIAL FAN ON THE PRESSURE DIFFERENCE CREATED BY IT**

ABSTRACT This scientific paper describes numerical and experimental investigation of the influence produced by a shape of the flow pass of axial fan on the level of created pressure difference. Conical, cylindrical, cylindrical and conical, spheroconical and other types of the shape of flow pass were investigated. Ultimate values of the levels of created pressure difference were defined provided that a high efficiency factor was retained for axial mine fans designed for the local ventilation of a full scale production. Recommendations on the use of some types of shapes of the flow pass for big axial fans of a high capacity were given to reduce specific quantity of metal and increase the efficiency in a wide range of operation modes. Investigation of the flow pass of the fan designed for the main local ventilation carried out using the 3D flow simulation and the experimental check showed an apparent advantage of the fan with the taper sleeve (flow pass with the meridional flow acceleration) in comparison with cylindrical meridional by-passes used at the present time. A total maximum pressure increment was 20 to 25 % and the maximum output increment was 20 to 30 %. First of all, this is related to a convergent behavior of the flow stream in the meridional plane, which results in a decrease of the influence of separated flows.

Key words: fan, flow pass, meridional acceleration, taper sleeve and the pressure.

Введение

Осевые вентиляторы широко применяются в таких областях как энергетика, горнодобывающая, металлургическая и химическая отрасли, в которых требуются большие расходы воздуха при достаточно высоком перепаде давления. Они, как правило, работают в длительных, непрерывных режимах. Поэтому оптимальный выбор аэродинамических параметров и конструкции вентиляторов является необходимым условием для удовлетворения современных требований по их экономичности при условии эффективной работы в широком диапазоне режимов.

Вентилятор, рассчитанный на предельные сочетания производительности и перепада давлений при максимальном КПД, должен обладать минимальными габаритами и окружными скоростями рабочих лопаток, обеспечивающих предельное сочетание коэффициента давления и коэффициента производительности при рациональной конструкции проточной части.

На сегодняшний день методики проектирования проточных частей осевых вентиляторов большой производительности при высоких значениях развиваемого давления, основаны на решении одномерных и квазиосесимметричных уравнений с использованием эмпирических зависимо-

стей, что обеспечивает создание конструкции с высоким, но недостаточным по современным требованиям, уровнем аэродинамической эффективности.

В работе представлены результаты исследования по влиянию геометрических характеристик проточной части осевого вентилятора на создаваемый перепад давлений, выполненного с использованием нового расчетно-экспериментального подхода.

Цель работы

Исследование влияния формы проточной части на уровень создаваемого им давления. Определение такой формы проточной части, при которой значение перепада давления будем максимальным при максимально высоком КПД.

Анализ существующих схем осевых вентиляторов

Анализ существующих конструкций высоконапорных осевых вентиляторов большой производительности показал, что предприятия производящие вентиляторы предлагают достаточно широкий выбор эффективных осевых вентиляторов различного технологического назначения [1–3]. К

© Н. И. Гриценко, В. Н. Голощачов, 2017

высоконапорным вентиляторам большой производительности относятся шахтные вентиляторы местного проветривания, главного проветривания, осевые дымососы и другие. Подавляющее большинство осевых вентиляторов местного проветривания представлены в виде одноступенчатых машин с цилиндрической проточной частью (серии ВМЭВО-А, А1, dGA1), и, как исключение, вентиляторы двухступенчатые серии ВМЭ-2, вентиляторы встречного вращения серии ВВМ, ВМЭВВ, а также, вентиляторы с конической проточной частью серии ВМЭ, ВМЭУ.

Осевые шахтные вентиляторы главного проветривания и осевые дымососы, являются крупными металлоёмкими машинами с мощностью привода до 5–7 МВт при непрерывном режиме работы. Эти турбомашины представлены в широком спектре аэродинамических характеристик [1–3] при одноступенчатом и двухступенчатом исполнении с цилиндрической формой проточной части. Исключением являются осевые дымососы с меридиональным ускорением потока компании TLT (Германия) с неповоротными лопатками рабочего колеса.

Востребованность осевых вентиляторов в различных схемах проветривания и схемах технологического назначения обусловлена рядом достоинств по сравнению с другими типами вентиляторных установок, а именно: экономичностью (максимальный полный КПД может достигать 90 %); возможностью глубокого регулирования механическим способом; низкой металлоемкостью; быстроходностью; для крупных вентиляторов (в том числе главного проветривания) снижением капитальных затрат на строительную часть в 2–3 раза; высокими реверсивными качествами; ремонтпригодностью.

К возможным недостаткам осевых вентиляторов можно отнести: наличием неустойчивых (срывных) режимов работы, ограничивающих диапазон эффективного использования; высокие требования к технологии изготовления лопаток; относительно невысокий напор; повышенный шум. Уровень напора, создаваемого вентилятором при высокой производительности, зависит от его аэродинамической схемы. Число ступеней вентилятора определяется числом рабочих колес, увеличение числа ступеней соответствует их последовательному соединению, и приводит к пропорциональному повышению давления, развиваемого вентилятором при заданной производительности [4].

При создании высоконапорных вентиляторов большой производительности реализуются схемы осевых вентиляторов с цилиндрической проточной частью (рис. 1).

Схема ВНА + К + СА является базовой для создания вентиляторов с высоким перепадом давления. КПД вентиляторов, выполненных по этой

схеме и коэффициенты давления, достаточно высокие. В схемах ВНА + К + СА при исходном, расчетном положении лопаток ВНА поток обычно закручивается против направления вращения рабочего колеса не больше, чем на половину скорости закручивания в колесе. Расчетная закрутка потока во ВНА схемы ВНА + К + СА по направлению вращения рабочего колеса у низкоскоростных вентиляторов при малых числах Маха ($M \leq 0,1$) обычно не применяется, так как максимальный КПД не повышается, а скорость закручивания потока за колесом значительно увеличивается, что усложняет выполнения эффективного спрямляющего аппарата.

К особенностям многоступенчатых вентиляторов можно отнести высокие значения коэффициента давления ($\Psi \leq 1,5$ и малые значения быстроходности), которые невозможно получить ни по одной из схем одноступенчатого вентилятора. Многоступенчатые вентиляторы могут быть выполнены как с направляющим аппаратом, так и без него. При наличии ВНА регулирование вентилятора более эффективно, а коэффициент давления имеет более высокое значение. Многоступенчатые вентиляторы в общем смысле представляют собой сложную аэродинамическую схему, составленную из нескольких более простых с особыми требованиями к взаимному расположению ступеней, параметрам закручивания и т.п. с целью минимизации как потерь, так и взаимного влияния элементов проточной части.

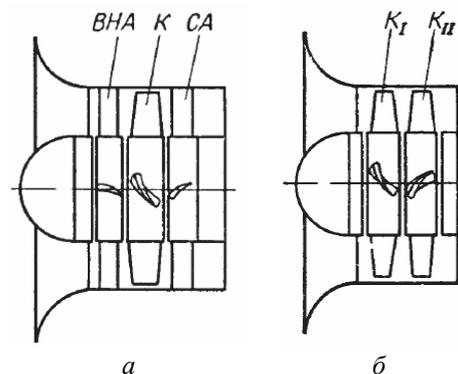


Рис. 1 – Аэродинамические схемы осевых вентиляторов с цилиндрической проточной частью: а – одноступенчатый вентилятор с входным направляющим аппаратом (ВНА) и со спрямляющим аппаратом (СА) (базовый вариант шахтных вентиляторов); б – вентилятор встречного вращения

К особому типу многоступенчатых вентиляторов, а именно двухступенчатых, можно отнести вентиляторы встречного вращения, выполненных по схеме $K_I + K_{II}$. Это вентиляторы, состоящие из двух рабочих колес противоположного вращения, без неподвижных лопаточных аппаратов. Двухступенчатые вентиляторы встречного вращения имеют коэффициенты давления и быстроходность,

как у обычного двухступенчатого вентилятора, и минимальные осевые размеры. Кривая давления у такого вентилятора при коэффициентах давления, производительности и величинах относительного диаметра втулки, равных значениям у обычного вентилятора, несколько более крутая, гистерезис между левой и правой ветвями характеристики отсутствует, разрыв в характеристике существенно меньше или даже отсутствует совсем. При углах установки больших, чем у обычных двухступенчатых вентиляторов, может иметь место монотонная или почти монотонная кривая давления. Объясняется это в основном благоприятным влиянием первого рабочего колеса на развитие срывных явлений во втором колесе.

Рабочие колеса вентиляторов встречного вращения имеют индивидуальный привод. Это усложняет конструкцию установки, но одновременно открывает возможности для необычного регулирования – изменением отношения частот вращения рабочих колес, при котором изменяется сама типовая, безразмерная характеристика (подобно тому, как и при регулировании изменением углов установки лопаток).

Осевой вентилятор с конической проточной частью (рис. 2) (меридионально-ускоренный) является весьма перспективным типом осевых вентиляторов так как использование меридионального ускорения потока, особенно в рабочем колесе, где течение обычно имеет диффузорный характер, способствует уменьшению диффузорности межлопаточных каналов и позволяет значительно увеличить аэродинамическую нагруженность рабочего колеса без опасности возникновения отрыва в каналах рабочего колеса. Увеличение меридиональной составляющей скорости течения в вентиляторах, достигнутое при небольших (0,6–0,7) значениях относительного диаметра втулки на выходе из колеса за счет уменьшения ее размера на входе (0,38–0,55) обеспечивает достижение коэффициента полного давления $\Psi = 1,0–1,3$, что недостижимо для одноступенчатых вентиляторов с цилиндрической проточной частью. При этом обеспечивается небольшое динамическое давление и максимальный (на уровне 88–90 %) КПД.

Применение осевых вентиляторов с меридиональным ускорением потока, у которых осевая составляющая скорости на выходе из рабочего колеса существенно выше, чем на входе, позволяет значительно расширить диапазон значений предельных параметров по давлению, по сравнению с осевыми вентиляторами с цилиндрической проточной частью. При этом аэродинамические (компоновочные) схемы, в которых может быть реализована технология меридионального ускорения во многом повторяют схемы, принятые для вентиляторов с цилиндрической проточной частью, а также многоступенчатые компоновки как цилиндрических, так и конических ступеней.

Основными преимуществами вентиляторов с меридиональным ускорением потока, как вентиляторов главного проветривания, по сравнению с традиционными вентиляторами с цилиндрической втулкой являются:

- достижение большего максимального полного давления на 25–30 %;
- снижение шума, благодаря пониженной осевой скорости потока на входе в рабочее колесо;
- уменьшенные входной диаметр и масса рабочего колеса;
- уменьшение массы вентилятора в целом по сравнению с вентилятором с цилиндрической проточной частью с аналогичными характеристиками;
- достижение характеристик двухступенчатого вентилятора при одноступенчатом исполнении (в сочетании с небольшим повышением частоты вращения);
- достижение характеристик одноступенчатого вентилятора с цилиндрической проточной частью при меньших окружных скоростях;
- перспективность применения меридионально ускоренных вентиляторов в системе газоочистки и в составе котлоагрегатов, благодаря обеспечению пониженной интенсивности газобразивного износа благодаря меньшей скорости;
- эффективная регулировка входным направляющим аппаратом [5].

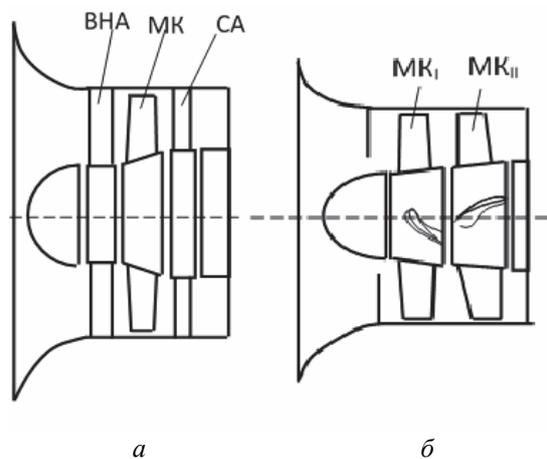


Рис. 2 – Аэродинамические схемы осевых вентиляторов с конической проточной частью: а – одноступенчатый вентилятор со спрямляющим аппаратом (СА) и входным направляющим аппаратом (ВНА); б – вентилятор встречного вращения

Объект и результаты исследования

При создании крупногабаритных вентиляторов высокой производительности широко применяется моделирование лопаточных систем, обеспечивающее полное газодинамическое подобие потока и оценку эффективности с учетом критериев подобия по числам Рейнольдса Re и M .

В качестве объекта исследования газодинамики потока высоконапорном вентиляторе главного проветривания был выбран одноступенчатый шахтный осевой вентилятор местного проветривания полной схемы (ВНА + МК + СА) цилиндрической проточной частью. С диаметром рабочего колеса 710 мм, втулочным отношением 0,67, мощностью привода 75 кВт, номинальной частотой вращения 3000 об/мин [6].

Данный вентилятор является серийным, достаточно эффективным и хорошо зарекомендовавшим себя при эксплуатации на горнорудных предприятиях. Характеристики данного вентилятора (интегральные и траверсирования потока за лопаточными системами) зафиксированы путем испытания на стенде и приняты за базовые при обследовании проточной части.

В процессе исследования было выполнено:

1) Газодинамическое проектирование лопаточных систем (ВНА + К + СА) в пределах конической проточной части для максимальных значений развиваемого давления с помощью разработанной методики в 2D постановке.

2) Численное исследование лопаточных систем с привлечением программного комплекса *IPMFlow* [7] и доводка геометрии лопаточных систем в 3D постановке с целью снижения потерь, вызванных трехмерным характером течения вязкого газа (воздуха).

Для экспериментального исследования полученных вариантов проточной части проведены:

1) Разработка конструкции вариантов выполнения конической проточной части (КП), а именно: сфероконическая (СКП), и цилиндроконическая (ЦКП), представленная на рис. 3.

Таблица 1 – Номинальные и максимальные характеристики осевого шахтного вентилятора с цилиндрической проточной частью и различными вариантами выполнения меридионального ускорения

Тип	$Q_{\text{ном}}$, м ³ /с	$P_{\text{в ном}}$, Па	Q_{max} , м ³ /с	$P_{\text{в max}}$, Па	η вентилятора, %	η рабочего колеса, %	K_f
ЦП	10	4200	15	4300	63	77	1
КП	12	4350	17	4950	72	89	1,3
СКП	13	3780	17	4750	69	85	1,5
ЦКП	14	4100	18	5250	74,8	92	1,4

Результаты как расчетного исследования трехмерного воздушного потока с привлечением программного комплекса [7], так и экспериментального исследования показали, что вентиляторы с меридиональным ускорением имеют преимущество перед вентиляторами, построенными на базе цилиндрической проточной части.

Прирост по максимальному полному давлению составляет 20–25 %, прирост по максимальной производительности – 25–30 %. Это связано, в первую очередь, с конфузурным характером течения потока в меридиональной плоскости, что ведет к уменьшению влияния отрывных течений. Особенно это актуально для корневых сечений лопа-

2) Численное исследование этих вариантов проточной части и отыскание геометрических соотношений новой проточной части с наибольшими значениями развиваемого давления и КПД.

3) Испытания вентилятора с различными вариантами проточной части, определение их интегральных характеристик.

4) Определение полей распределения полного давления за лопатками рабочего колеса и спрямляющего аппарата на режиме максимального КПД при помощи комбинированных зондов статического и полного давления.

Для исследования было спроектировано двенадцать вариантов дизайна проточной части, которые отличались не только конструктивным исполнением втулки рабочего колеса (коническая, сфероконическая, цилиндроконическая), а и степенью меридионального ускорения – отношением площади входного сечения к выходному сечению (K_f). Результаты исследования для четырех основных вариантов (см. рис. 3) приведены в табл. 1 и на рис. 4.

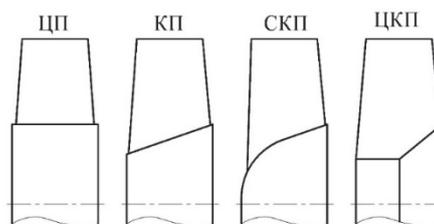


Рис. 3 – Варианты выполнения проточной части: ЦП – цилиндрическая проточная часть (П); КП – коническая П; СКП – сфероконическая П; ЦКП – цилиндроконическая П

ток, где окружная скорость минимальна, а относительный поворот потока в межлопаточном канале – максимален. Меридиональное ускорение потока позволило повысить аэродинамическую нагрузку в корневых сечениях и осуществить большее по значению отклонение потока по отношению к относительной скорости входа в канал. Следствием этого явилось увеличение доли статического давления, развиваемого в рабочем колесе. Густота лопаточной системы, посчитанная по коническим линиям тока, оказалась выше чем у лопаточной системы, построенной на базе цилиндрической проточной части при одинаковой ширине рабочего колеса.

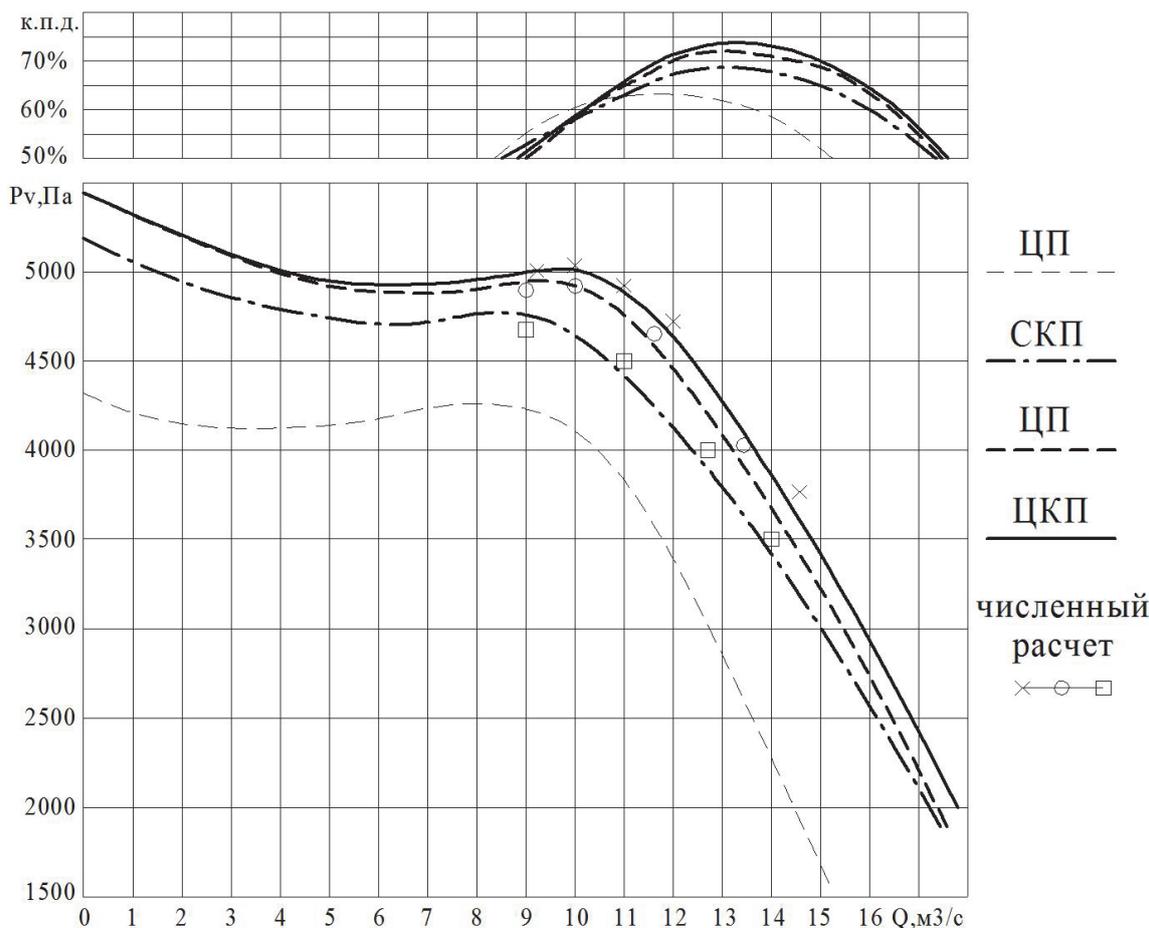


Рис. 4 – Результаты численного и экспериментального исследования

Выводы

Анализ конструктивного оформления проточной части вентиляторов главного проветривания показал, что их совершенствование для обеспечения высокой экономичности при высоких производительности и напоре невозможно без привлечения современных методов трехмерного газодинамического расчета течения вязкого газа. Проведенное исследование проточной части вентилятора главного местного проветривания как с привлечением 3D моделирования потока, так и экспериментальной проверки показало явное преимущество вентилятора с конической втулкой (проточная часть с меридиональным ускорением потока) по сравнению с применяемой в настоящее время цилиндрическими меридиональными обводами. Результаты исследования показали, что эффективное соотношение площадей входа в рабочее колесо и выхода (коэффициент меридионального ускорения K_f) находится в пределах 1,25–1,55. При увеличении этого параметра значительно возрастают потери в рабочем колесе, наблюдаются развитые отрывные течения на выходе из межлопаточных каналов корневых сечений лопаток. При этом наблюдается хорошее совпадение результатов 3D расчетов проточной части с результатами

эксперимента.

Список литературы

- 1 Каталог продукции завода «Донвентилятор» [Электронный ресурс] / ООО «Донвентилятор». – Харьков, 2017. – Режим доступа: <https://donvent.com>. – 06.01.2017.
- 2 ВЕНТПРОМ (вентиляция и кондиционирование) [Электронный ресурс] / АО «АМЗ «ВЕНТПРОМ». – Артемовский, 2017. – Режим доступа: <https://www.ventprom.com.ua>. – 06.01.2017
- 3 Korfmann Lufttechnik GmbH [Electronic resource] / Company Korfmann Lufttechnik GmbH. – 2017. – Access mode: <http://www.korfmann.com>. – 06.01.2017.
- 4 **Русанов, А. В.** Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин / **А. В. Русанов, С. В. Ершов.** – Харьков : ИПМаш НАН Украины, 2008. – 275 с. – ISBN 966-02-1956-1.
- 5 **Брусиловский, И. В.** Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ / **И. В. Брусиловский** – Москва : Недра, 1978. – 198 с.
- 6 **Пак, В. В.** Шахтные вентиляционные установки местного проветривания / **В. В. Пак, С. К. Иванов, В. П. Верещагин.** – Москва : Недра, 1974. – 237 с.
- 7 Патент на полезную модель 70123 Украина МПК F04D 29/54, F04D 29/56 Осевой вентилятор с входным патрубком и регулируемым направляющим аппаратом / **Иванов С. К., Мавродий С. В., Гриценко**

Н. И. ; заявитель и патентообладатель Мавродий С. В. – Заявл. 28.11.11 ; опубл. 25.05.12. Бюл. № 10. – 5 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **ООО «Donventilyator»** (2017), Catalog products factory "Donventilyator", available at: <https://donvent.com> (accessed 06 January 2017).
- 2 **АО «AMZ «VENTPROM»**. (2017), VENTPROM (Ventilation and air conditioning), available at: <https://www.ventprom.com.ua> (accessed 06 January 2017).
- 3 **Company Korfmann Lufttechnik GmbH** (2017), Korfmann Lufttechnik GmbH, available at: <http://www.korfmann.com> (accessed 06 January 2017).
- 4 **Rusanov, A. V. and Ershov, S. V.** (2008), *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh gazod-*
- 5 **Brusilovskiy, I. V.** (1978), *Aerodinamicheskie shemy i harakteristiki osevykh ventilyatorov TsAGI [The aerodynamic characteristics of the circuit and axial fans Central Aero-Hydrodynamic Institute]*, Nedra, Moscow, Russian.
- 6 **Pak, V. V., Ivanov, S. K. and Vereschagin, V. P.** (1974), *Shahtnyie ventilyatsionnyie ustanovki mestnogo provetrivaniya [Mine ventilation systems of local ventilation]*, Nedra, Moscow, Russian.
- 7 **Ivanov, S. K., Mavrodiy, S. V. and Gritsenko, N. I.** (2012), "Osevoy ventilyator s vhodnyim patrubkom i reguliruemym napravlyayuschim apparatom [Axial fan with inlet and adjustable guide vanes]", *State Register of Patents of Ukraine*, Kiev, UA, Pat. № 70123.

Сведения об авторах (About authors)

Гриценко Никита Игоревич – аспирант, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины; г. Харьков, Украина; e-mail: donvent@gmail.com.

Grytsenko Nikita – Graduate Student, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Голошапов Владимир Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, старший научный сотрудник отдела моделирования и идентификации тепловых процессов; г. Харьков, Украина; e-mail: paramonova@ipmach.kharkov.ua.

Goloshchapov Vladimir – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Department for Modeling and Identification of Thermal Processes, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Гриценко, Н. И. Влияние формы проточной части на уровень давления создаваемый осевым вентилятором / **Н. И. Гриценко, В. Н. Голошапов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 90–95. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.15.

Please cite this article as:

Grytsenko, N. and Goloshchapov, V. (2017), "Influence of Geometric Characteristics of the Flow Pass of Axial Fan on the Pressure Difference Created by It", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 90–95, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.15.

Будь ласка посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Гриценко, М. І. Вплив форми проточної частини на рівень тиску створюваний осевим вентилятором / **М. І. Гриценко, В. М. Голошапов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 90–95. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.15.

АНОТАЦІЯ У статті представлені чисельні та експериментальні дослідження впливу форми проточної частини осевого вентилятора на рівень створюваного тиску. Досліджено конічні, циліндричні, циліндроконічні, сфероконічні і інші типи форм проточної частини. Визначено граничні значення рівня створюваного тиску за умови збереження високого коефіцієнта корисної дії для осевих шахтних вентиляторів місцевого провітрювання серійного виробництва. Дано рекомендації щодо застосування окремих типів форм проточної частини для великих осевих вентиляторів великої продуктивності з метою зниження металоємності і підвищення ефективності в широких межах режимів роботи.

Ключові слова: вентилятор, проточна частина, меридіональне прискорення, втулка, тиск.

Поступила (received) 14.02.2017