

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА РАДИАЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Н. В. Макаров, В. Н. Макаров, А. А. Солдатенко, Н. Е. Лаврѐнов

Mathematical model of energy regulator of radial fan

N. V. Makarov, V. N. Makarov, A. A. Soldatenko, N. E. Lavrenov

The subject of research in the article are energy regulators of radial fans. The purpose of the article is improving of the adaptability and efficiency radial fans by optimizing the parameters of the energy regulator based on the developed mathematical model. The idea of this work is to use the power of control flow of high-pressure cavity of the fan case in order to change the angular momentum of the main stream at the inlet of the impeller. Methodologically the work uses: the similarity theory, physical modeling and experimental design.

On a specially designed aerodynamic stand with vortex chamber authors experimentally obtained aerodynamic characteristics of a low-channel and vaneless energy regulators.

According to the obtained values of the factors determining the efficiency of energy regulators for a discrete number of values of the pressure coefficients of control flow authors produced the optimal interpolation values of its parameters using the least squares method. They also carried out an analysis of the influence of the energy characteristics of the flow control on the efficiency of the energy regulator.

As a result of full-scale experimental studies one can use obtained formulas to calculate the values of the geometric parameters of energy regulators, and test fan of ВРВП series with the energy regulator. These formulas has also allowed to develop an engineering design technique for power control and set up their standard series for the main ventilation fans, performed on the aerodynamic configuration Ц70-20, Ц76-16, Ц76-12 and Ц70-15.

Compared to axial guide vanes, energy regulators allow increasing the depth of the economic regulation of the centrifugal fan by 26 %.

Keywords: fan; power control; aerodynamics; flow; stand; mathematical model; turbomachinery regulation; directing devices.

Предметом исследования являются энергетические регуляторы радиальных вентиляторов. Цель статьи – повышение адаптивности и экономичности радиальных вентиляторов путем оптимизации параметров энергетического регулятора на базе разработанной математической модели. Идея данной работы заключается в использовании энергии управляющего потока полости высокого давления корпуса вентилятора для изменения кинетического момента основного потока на входе в рабочее колесо. Методологически в работе использованы теории подобия, физического моделирования и планирования эксперимента. На специально спроектированном аэродинамическом стенде с вихревой камерой экспериментально получены аэродинамические характеристики малоканальных и безлопаточных энергетических регуляторов. По полученным значениям факторов, определяющих эффективность энергетических регуляторов для дискретного ряда значений коэффициента давления управляющего потока, была произведена интерполяция оптимальных значений его параметров с использованием метода наименьших квадратов. Проведен анализ влияния энергетических характеристик управляющего потока на эффективность энергетического регулятора. По результатам натурных экспериментальных исследований получены формулы для расчета значений геометрических параметров энергетических регуляторов, а также испытания вентилятора серии ВРВП с энергетическим регулятором, позволившие разработать инженерную методику проектирования энергетического регулятора и создать их типоразмерный ряд для вентиляторов главного проветривания, выполненных по аэродинамическим схемам Ц70-20, Ц76-16, Ц76-12 и Ц70-15. По сравнению с осевыми направляющими аппаратами, энергетические регуляторы позволяют увеличивать глубину экономичного регулирования центробежного вентилятора на 26 %.

Ключевые слова: вентилятор; энергетический регулятор; аэродинамика; поток; стенд; математическая модель; регулирование турбомашин; направляющие аппараты.

Используемые в настоящее время регулирующие устройства могут быть условно отнесены к механическим средствам регулирования, поскольку их действие основано на трансформации геометрии проточной части вентилятора и, как следствие, кинематических параметров потока [1]. Большие потенциальные возможности повышения адаптивных свойств шахтных вентиляторов заложены в энергетическом методе регулирования режимов их работы [2–4]. Наиболее рациональным средством реализации данного метода, с точки зрения простоты конструктивного исполнения, при высокой эффективности энергопотребления, является энергетический регулятор (ЭР). Действие ЭР основано на изменении кинетического момента основного потока на входе в рабочее колесо за счет энергии управляющего потока полости высокого давления корпуса вентилятора. Компоночная схема центробежного вентилятора позволяет удачно вписать в него ЭР, обеспечив эффективное регулирование энергии и подачи управляющего потока, а также исключить отрицательное влияние направляющих аппаратов на максимальный КПД вентилятора при работе на номинальном режиме.

Конструктивно ЭР представляет собой лопаточный, малоканальный или безлопаточный направляющий аппарат, установленный кон-

центрично на входном патрубке вентилятора и соединяющий полость высокого давления корпуса с входом в рабочее колесо [5]. Наиболее перспективными по конструктивному исполнению и эффективности являются безлопаточный и малоканальный энергетические регуляторы.

Регулирование энергии управляющего потока производится за счет изменения его расхода. Поскольку управляющий поток в форме вихревого жгута составляет не более 20 % от подачи вентилятора, то отрицательное влияние дросселирования при прохождении его через ЭР сказывается незначительно на эффективности регулирующего устройства. Изменение проходного сечения проточной части ЭР происходит за счет изменения его ширины b и длины (высоты) расходного окна межлопаточного канала на выходе $s_2(h)$. В зависимости от применяемого способа регулирования расхода управляющего потока достигается различный уровень потерь энергии в ЭР, изменения структуры потока на выходе из него [6].

В литературе до сих пор отсутствуют данные по системным исследованиям эффективности ЭР, что не позволяет разработать его аэродинамическую схему с учетом параметров вентилятора.

Аналитическое описание механизма взаимодействия управляющего и основного потоков ЭР чрезвычайно сложно и без существенных допущений не представляется возможным. Поэтому в данной работе построена математическая модель аппарата на базе экспериментальных данных с использованием теории подобия, физического моделирования и планирования эксперимента [7, 8].

Испытания ЭР были проведены на специально спроектированном для решения данной задачи стенде с вихревой камерой (рис. 1).

Стенд для испытания ЭР (рис. 1) состоит из спиральной камеры 1, в которой имитируется поток в корпусе высокого давления центробежного вентилятора, испытуемого ЭР 2 со сменными объемными лопатками 3 малоканального аппарата (либо без лопаток), аксиально подвижным диском 4, коллекторами 5, 6, подающим 7 и выходным 8 воздуховодами, в которых установлены измерительные приемники давления. В спиральную камеру подаются управляющий Q_1 и транзитный Q_2 потоки, которые после смешивания образуют суммарный поток Q_3 , измеряемый приемниками давления 9.

В качестве плана эксперимента, с учетом статистического метода линейного планирования была использована дробная реплика 2^{4+1} с генерирующим соотношением, обеспечивающим её максимальную разрешающую способность [1].

Стенд для аэродинамических испытаний (рис. 2, 3) вентилятора серии ВРВП – 1, включающий ЭР 2, состоит из входного (соединительного) патрубка испытательного стенда 3, струи выпрямителя 4, измерительного воздуховода 5, кольцевого манометра 6, трубки Пито 7, сопла 8, термометра 9 для измерения температуры в воздуховоде, барометра для

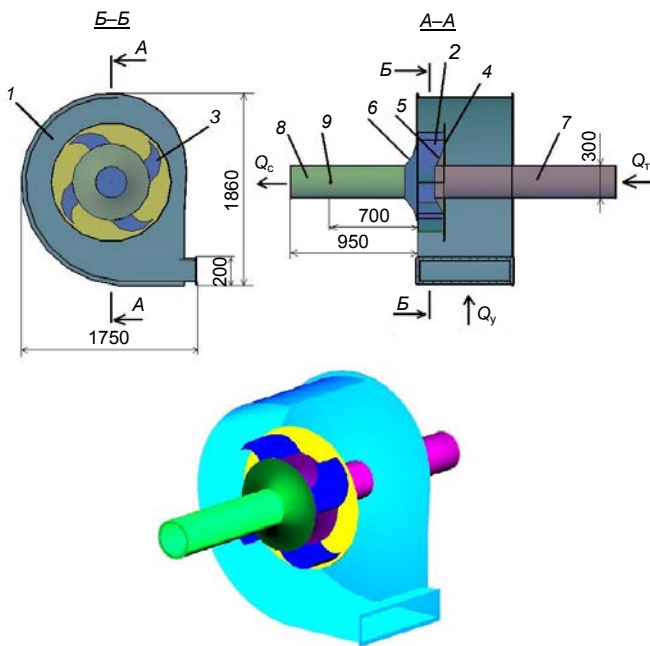


Рисунок 1. Схема и 3D-модель вихревой аэродинамической камеры / Figure 1. The scheme and 3D model of a wind vortex chamber.

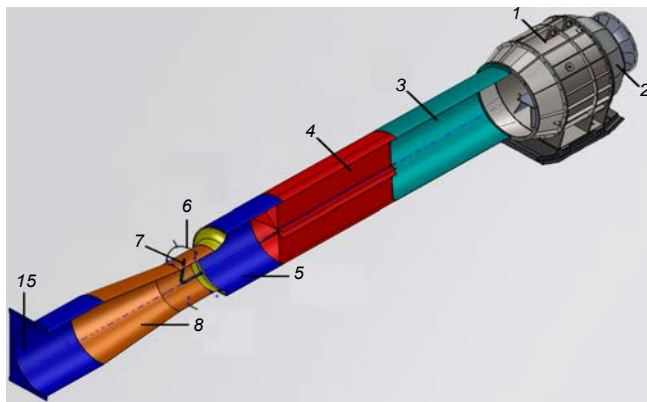


Рисунок 2. 3D-модель стенда для аэродинамических испытаний вентиляторов с подключенным вентилятором ВРВП-6 с энергетическим регулятором / Figure 2. 3D model of the stand for aerodynamic testing of fans with an attached fan ВРВП-6 with the energy regulator.

измерения атмосферного давления 10, термометра для измерения окружающей среды 11, барометра для измерения атмосферного давления 12, термометра для измерения температуры окружающей среды 13, психрометра 14, дроселирующего устройства 15.

Факторами, определяющими функцию отклика ϵ , были приняты P_y , b , h , D_n , β , где $\epsilon = \bar{\Gamma}_c / \lambda_y$ – эффективность ЭР; P_y – давление управляющего потока; b – ширина ЭР; h – высота окна межлопаточного канала; D_n – диаметр установки неподвижных лопаток; β – угол схода коллектора.

Предварительными испытаниями установлена автомодельность α от остальных геометрических параметров. Экспериментально подтверждена автомодельность течения в ЭР от числа Рейнольдса.

Коэффициент циркуляции смешанного потока:

$$\bar{\Gamma}_c = \frac{\sum_{i=1}^{10} \bar{r}_i v_{cri} v_{coi}}{\sum_{i=1}^{10} v_{coi}}$$

где \bar{r}_i – радиус установки приемника давления в i -м измерительном кольцевом сечении камеры смешения потоков; v_{cri} – коэффициент окружной скорости смешанного потока в i -м измерительном кольцевом сечении; v_{coi} – коэффициент осевой скорости смешанного потока в i -м

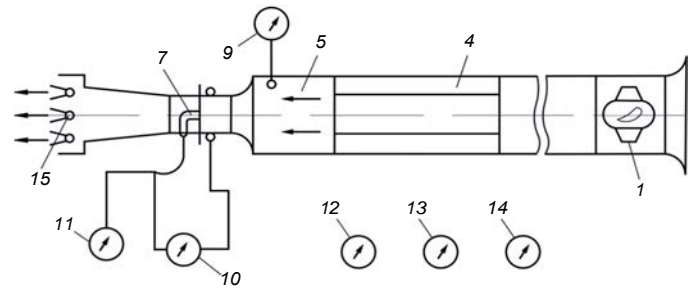


Рисунок 3. Схема аэродинамического стенда для испытаний вентиляторов с измерительными приборами / Figure 3. The scheme of the aerodynamic stand for testing of fans with measuring devices.

измерительном кольцевом сечении; $\lambda_y = q_y h_y$ – коэффициент мощности управляющего потока.

Опыты проводились при $Re \geq 5 \times 10^5$. Из выражения для коэффициента мощности управляющего потока $\lambda_y = q_y h_y$ видно, что исследование эффективности ЭР можно привести к определению зависимостей (b , h , D_n) = $F_1(P_y)$, $\beta = F_2(P_y)$.

Обработка экспериментального материала производилась с использованием критериев Кохрена для проверки однородности дисперсий параллельных опытов, Стьюдента – для проверки значимости коэффициентов регрессии, Фишера – для проверки адекватности полученной модели при 2,5 %-ном уровне значимости.

По полученным оптимальным значениям факторов, определяющих эффективность ЭР для дискретного ряда значений коэффициента давления управляющего потока, была произведена интерполяция искомых функций с использованием метода наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} \bar{b}_{opt} &= 1,56 \bar{P}_f^{-1} - 0,74; \quad \bar{h}_{opt} = 0,031 \bar{P}_f^{-1} + 0,77 \bar{P}_f^2; \\ \bar{D}_n &= 1,15 \bar{P}_f^{2,15}; \quad \beta_{opt} = 4,45 \bar{P}_f^{2,15}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{P}_f = P_f / P_{f,opt}$ – относительный коэффициент давления управляющего потока на поверхности его смещения с транзитным потоком.

Использование \bar{P}_f в качестве критерия подобия, т. е. рассмотрение только внешней аэродинамики ЭР позволило получить универсальные зависимости для оптимальных геометрических параметров исследованных ЭР: лопаточного, малоканального, безлопаточного.

Вопросы внутренней аэродинамики аппаратов такого типа, определение их энергетических характеристик достаточно глубоко освещены в литературе.

На рис. 4 приведены графики зависимостей (1), из анализа которых можно сделать следующие выводы.

С ростом давления управляющего потока увеличивается оптимальная высота межлопаточного канала \bar{h}_{opt} и уменьшается ширина ЭР \bar{b}_{opt} , при этом площадь расходного окна, т. е. $\bar{b}_{opt} \cdot \bar{h}_{opt}$, уменьшается. Это обусловлено особенностями взаимодействия струи управляющего и транзитного потоков. Увеличение скорости управляющего потока, связанное с ростом \bar{P}_f , приводит к необходимости уменьшения поверхности трения потоков, т. е. уменьшения \bar{b} , а рост градиента скорости по толщине струи управляющего потока способствует увеличению \bar{h} , при этом происходит снижение потерь энергии в зоне смещения на единицу мощности управляющего потока. Уменьшение площади расходного окна обусловлено тем, что оптимальная мощность управляющего потока изменяется незначительно с изменением P_f и лежит в диапазоне 0,55–0,6 мощности смешанного потока. Уменьшение диаметра поверхности смещения управляющего и транзитного потоков с ростом P_f обуславливает уменьшение потерь энергии на трение. Уменьшение угла схода коллектора с ростом P_f способствует уменьшению потерь энергии на «удар» в расчете на создаваемую удельную циркуляцию смешанного потока.

На рис. 5 приведены результаты экспериментальных исследований неравномерности циркуляций управляющего потока в зависимости от \bar{P}_f . Из анализа рис. 5 видно, что наиболее эффективным с позиции обеспечения равномерности циркуляции управляющего потока является безлопаточный ЭР.

Таким образом, полученные уравнения (1) могут быть использованы для расчета параметров аэродинамической схемы ЭР, обеспечивающего наибольшую эффективность использования энергии управляющего потока.

Следует особо подчеркнуть, что вследствие различия энергетических характеристик безлопаточного и малоканального ЭР наибольшее

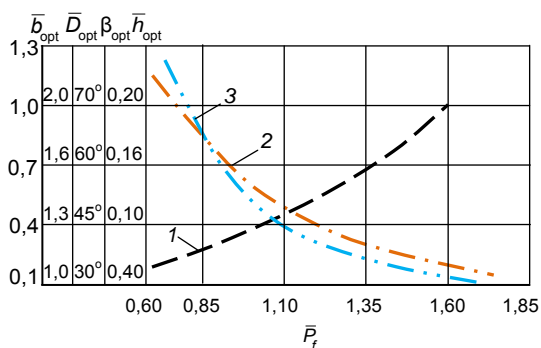


Рисунок 4. Зависимость оптимальных геометрических параметров ЭР от давления, развиваемого вентилятором. 1 – по ширине ЭНА; 2 – по высоте окна канала; 3 – по диаметру / Figure 4. The dependence of the optimal geometric parameters of the energy regulator from the pressure developed by the fan.

значение эффективности достигается для разных их исполнений в зависимости от расчета по P_y и P_f . Если в качестве критерия подобия принять коэффициент давления управляющего потока на поверхности смешения P_f , т. е. оценивать только внешнюю аэродинамику взаимодействия управляющего и транзитного потоков, то максимальную эффективность, КПД и аэродинамическое качество имеет лопаточный ЭР: $\epsilon_f = 0,93$; $\eta_f = 0,94$; $K_f = 3,7$ [9].

В случае учета потерь энергии, в том числе и непосредственно в ЭР, т. е. при проведении исследований совместно внешней и внутренней аэродинамики лучшие показатели имеет безлопаточный ЭР:

$$\epsilon_y = 0,83; \eta_y = 0,85; K_y = 3,1.$$

Приведенные экспериментальные исследования и полученные формулы для расчета значений геометрических параметров ЭР, а также испытания вентилятора серии ВРВП с ЭР позволили разработать инженерную методику проектирования ЭР и создать их типоразмерный ряд для вентиляторов главного проветривания, выполненных по аэродинамическим схемам Ц70-20, Ц76-16, Ц76-12 и Ц70-15 [10].

По сравнению с осевыми направляющими аппаратами, ЭР позволяют увеличивать глубину экономичного регулирования центробежного вентилятора на 26 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носырев Б. А., Белов С. В. Вентиляторные установки шахт и метрополи-
тепов. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2000. 278 с.
2. Петров А. В. Энергетические методы управления подъемной силой крыла.
М.: Физматлит, 2011. 404 с.
3. Баутин С. П., Обухов А. Г. Математическое моделирование разрушитель-
ных атмосферных вихрей. Новосибирск: Наука, 2012. 152 с.
4. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г., Баутин К. В. Разрушительные
атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты. Новосибирск: Наука;
Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. 215 с.
5. Макаров Н. В., Копачев В. Ф. Регулирование центробежных вентиляторов
энергетическим направляющим аппаратом // Горное оборудование и элект-
ротехника. 2007. № 5. С. 43–46.
6. Макаров В. Н., Макаров Н. В., Закиев Р. В. Идеальная аэродинамическая
характеристика центробежного вентилятора с энергетическим регулятором
// ГИАБ. 2009. Т. 16, № 12. С. 349–356.
7. Идельчик И. Е. Аэродинамика технологических аппаратов. М.: Машино-
строение, 1983. 351 с.

Николай Владимирович Макаров,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой горной механики
mnikolay84@mail.ru
Владимир Николаевич Макаров,
доктор технических наук, профессор
Андрей Алексеевич Солдатенко,
студент 3 курса
Никита Евгеньевич Лаврénов,
студент 3 курса
Уральский государственный горный университет
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

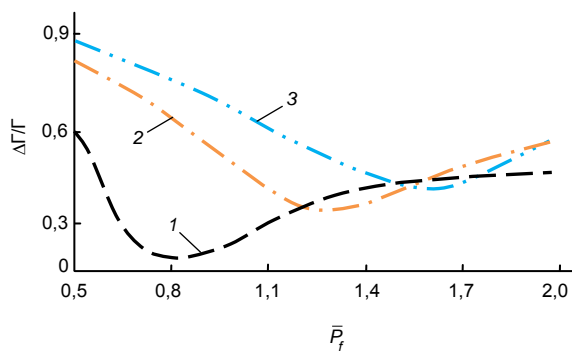


Рисунок 5. Неравномерность циркуляции на выходе ЭР. 1 – безлопаточ-
ный ЭР; 2 – одноканальный ЭР; 3 – четырехканальный ЭР / Figure 5. The
unevenness of circulation at the output of the energy regulator.

8. Потапов В. Я. Разработка математической модели движения частиц в се-
параторе по трению и упругости // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 3. С.
60–65.
9. Englar R. J. Overview of circulation control pneumatic aerodynamics. In: Appli-
cations of circulation control technology, Progress in astronautics and aeronau-
tics. Vol. 214, AIAA, 2006. pp. 23–68.
10. Макаров Н. В., Шавлов Е. Н., Макаров В. Н. Аэродинамический расчет
энергетического регулятора вентиляторов местного проветривания // Техно-
логическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб.
статей XIII Междунар. науч.-техн. конф. Чтения памяти В. Р. Кубачека. 2015.
С. 81–85.

REFERENCES

1. Nosyrev B. A., Belov S. V. 2000, *Ventilyatornye ustanovki shakht i metropoli-
itenov* [Fan installations of mines and subways], Ekaterinburg, 278 p.
2. Petrov A. V. 2011, *Energeticheskie metody upravleniya pod'emnoy siloy kryla*
[Energy management of wing lift techniques], Moscow, 404 p.
3. Bautin S. P., Obukhov A. G. 2012, *Matematicheskoe modelirovanie razrushit-
itel'nykh atmosfemykh vikhrey* [Mathematical modeling of destructive atmospheric
vortices], Novosibirsk, 152 p.
4. Bautin S. P., Krutova I. Yu., Obukhov A. G., Bautin K. V. 2013, *Razrushitel'nye
atmosfemnye vikhri: teoremy, raschety, eksperimenty* [Destructive atmospheric
vortices: theorems, calculations, experiments], Ekaterinburg, 215 p.
5. Makarov N. V., Kopachev V. F. 2007, *Regulirovanie tsentrobezhnykh ventilya-
torov energeticheskim napravlyayushchim apparatom* [Regulation of centrifugal
fans using energy guide vanes]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining
Equipment and Electromechanics], no. 5, pp. 43–46.
6. Makarov V. N., Makarov N. V., Zakiev R. V. 2009, *Ideal'naya aerodinamich-
eskaya kharakteristika tsentrobezhnogo ventilyatora s energeticheskim regu-
lyatorom* [Ideal aerodynamic characteristics of a centrifugal fan with an energy
regulator]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational
and analytical bulletin], vol. 16, no. 12, pp. 349–356.
7. Idel'chik I. E. 1983, *Aerodinamika tekhnologicheskikh apparatov* [Aerodynami-
cs of technological devices]. Moscow, 351 p.
8. Potapov V. Ya. 2011, *Razrabotka matematicheskoy modeli dvizheniya chastits
v separatore po treniyu i uprugosti* [Development of mathematical model of the
motion of particles in the separator by friction and elasticity]. *Izvestiya vuzov.
Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 3, pp. 60–65.
9. Englar R. J. 2006, Overview of circulation control pneumatic aerodynamics.
In: Applications of circulation control technology, Progress in astronautics and
aeronautics, AIAA, vol. 214, pp. 23–68.
10. Makarov N. V., Shavlov E. N., Makarov V. N. 2015, *Aerodinamicheskii ras-
chet energeticheskogo regul'yatora ventilyatorov mestnogo provetrivaniya* [Aer-
odynamic calculation of the energy regulator of local ventilation fans]. *Tekhnol-
ogicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: sbornik
statey XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Chteniya
pamyati V. R. Kubacheka* [Technological equipment for mining and oil and gas
industry: a collection of articles of the XIII International scientific-technical confer-
ence of memory of V. R. Kubachek], pp. 81–85.

Nikolay Vladimirovich Makarov,
PhD
mnikolay84@mail.ru
Vladimir Nikolaevich Makarov,
Dr, Professor
Andrey Alekseevich Soldatenko,
student
Nikita Evgen'evich Lavrenov,
student
Ural State Mining University
Ekaterinburg, Russia