

П. В. Косых¹, С. С. Шевченко¹✉

Расчёт аэродинамической характеристики реверсивного осевого вентилятора с поочередно установленными на разные углы лопатками рабочего колеса

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: tu-22-m3@mail.ru

Аннотация. Реверсирование вентиляторов является важной частью обеспечения безопасности горного предприятия. В тоннельной вентиляции реверсирование струи может являться частью технологического процесса проветривания. Повышение эффективности и производительности работы вентилятора в реверсивном режиме является важной задачей. В статье рассмотрен способ повышения реверсивных качеств осевого вентилятора, заключающийся в поочередной установке лопаток в развёрнутое на 180° положение. С помощью численного расчёта получены характеристики такого вентилятора. Показано, что производительность такого вентилятора на 17% выше, чем исходного. Эффективность работы в реверсивном режиме повышается на 20%. При этом показатели производительности и эффективности в прямом режиме снижаются на 25% и 12% соответственно

Ключевые слова: реверсивный осевой вентилятор, способ реверсирования, неоднородная решетка профилей

P. V. Kosykh¹, S. S. Shevchenko¹✉

Calculation of the aerodynamic characteristics of a reversible axial fan with impeller blades set at different angles

¹Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: tu-22-m3@mail.ru

Abstract. Fan reversibility is an important part of ensuring mine safety. In tunnel ventilation, airflow reversal can be part of the ventilation process. Improving fan efficiency and performance in reversible mode is a key task. This article discusses a method for improving the reversibility of an axial fan by alternately rotating the blades 180°. Numerical calculations were used to obtain the characteristics of this fan. It was shown that the performance of this fan is 17% higher than that of the original fan. Operating efficiency in reversible mode increases by 20%. However, performance and efficiency in direct mode decrease by 25% and 12%, respectively.

Keywords: axial reversible fan, the method of reversal, non-uniform airfoil cascade

Введение

Правила безопасности в угольных шахтах [1] предъявляют к вентиляторам главного проветривания требование обеспечить реверсирование вентиляционной струи с производительностью не менее 60% от расхода воздуха при нормальном

режиме проветривания. В тоннельной вентиляции реверсирование вентиляционной струи может быть частью технологического процесса проветривания и составлять значительную часть времени её работы [2].

В связи с этим актуальной является задача повышения производительности и эффективности работы осевых вентиляторов в реверсивном режиме работы. Наиболее распространённым и технологически простым способом реверсирования осевого вентилятора является изменение направления вращения его рабочего колеса с изменением углов установки лопаток аппаратов в благоприятное для реверсирования положение (рис. 1а). Однако этот способ сопряжён с значительными потерями давления вследствие несоответствия поворота потока в проточной части вентилятора средней линии профилей лопаток [2].

За последние 30 лет исследователями изучены ряд способов повышения реверсивных качеств осевых вентиляторов. Среди них можно выделить применение лопаток с симметричным эллиптическим профилем [2], лопаток с S-образным профилем [3, 4], реверсирование приведением во вращение направляющего аппарата (НА) с остановленным РК [5].

Авторами рассмотрен вопрос эффективности и производительности вентилятора в реверсивном режиме при поочередной установке лопаток РК в развёрнутое на 180° положение (рис. 1б). Такой способ повышения реверсивных качеств предложен Бычковым А.В. и упомянут в [2].

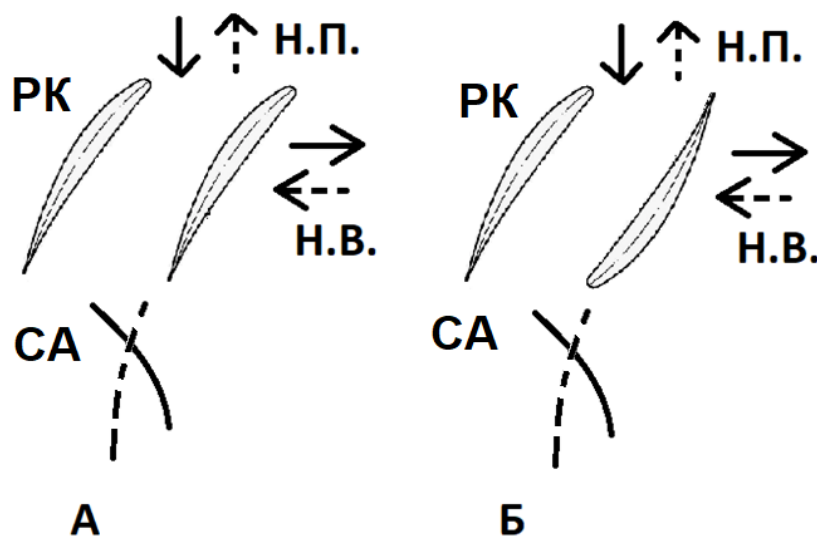


Рис. 1. Положение лопаток вентилятора в прямом и реверсивном режимах работы: А – реверсирование вентилятора при обычном положении лопаток РК; Б – поочередной установке лопаток РК в развёрнутое на 180° положение

Методы и материалы

Для исследований была выбрана аэродинамическая схема ЦАГИ ОВ-103 (РК+СА) [6], широко применяемая в тоннельных осевых вентиляторах. Для такой схемы существуют экспериментально полученные характеристики прямого

и реверсивного режимов. Эти характеристики получены для вентилятора диаметром $D = 700$ мм, при относительном диаметре втулки $v = 0,6$ и частоте вращения $n = 1000 \div 1200$ об/мин. При реверсировании СА выполняет роль НА. Для повышения давления его лопатки разворачивают в реверсивное положение, соответствующее подкручиванию потока навстречу движению лопаток РК. Лопаточный венец РК имеет 10 лопаток, СА – 14 лопаток.

Моделирование трёхмерного установившегося течения в проточной части вентилятора.

Для получения расчётных характеристик аэродинамической схемы, полученной на основе ЦАГИ ОВ-103 (РК+СА) путём поочередного поворота лопаток РК на 180° через одну, был использован пакет программ ANSYS. Для решения задачи трёхмерного обтекания лопаточных венцов в программе ANSYS Design Modeler была построена трёхмерная модель последовательности секторов проточной части (рис. 2), соответствующих входу в вентилятор (1), сектору РК, включающему две лопатки (2), сектору СА с одной лопаткой (3) и выходу из вентилятора (4).

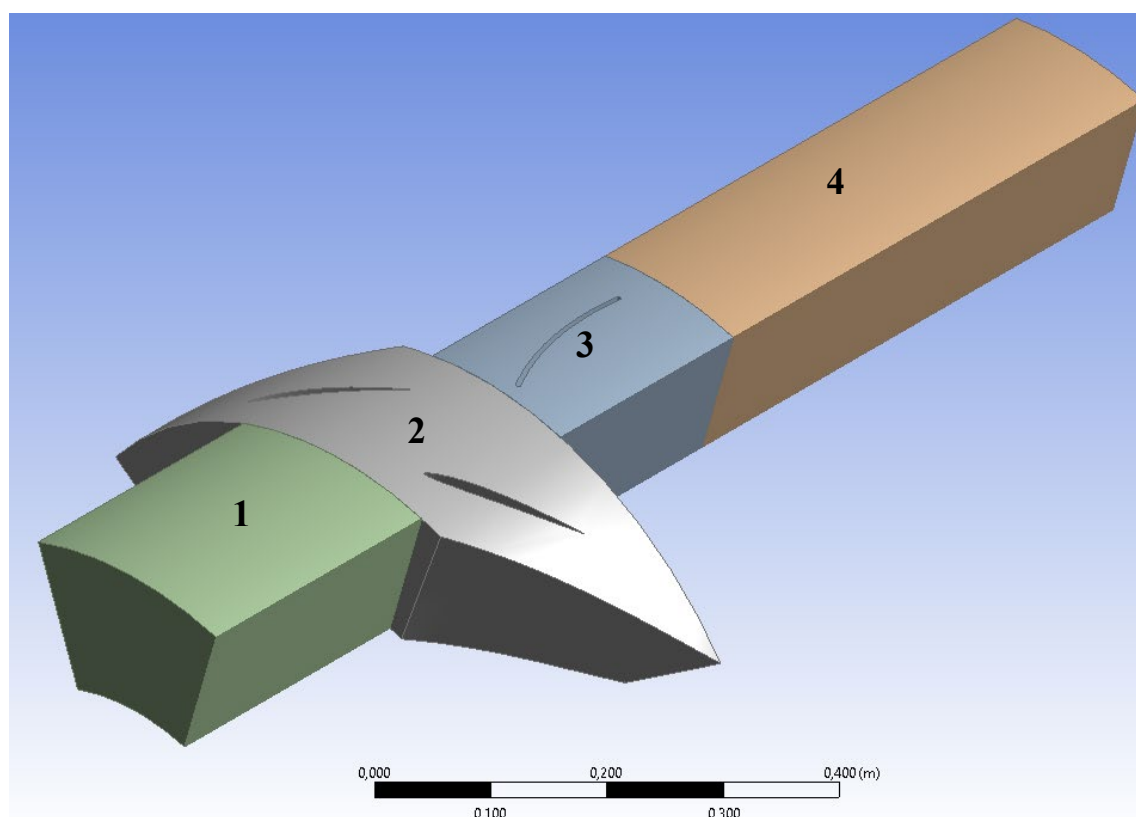


Рис. 2. Расчетная модель проточной части осевого вентилятора ЦАГИ ОВ-103 (РК+СА):

1 – входная область, 2 – область РК, 3 – область СА, 4 – выходная область

По созданным секторам были построены расчётные сетки из объёмных элементов (рис.3). Количество элементов составило порядка 4 млн. В расчётных

сетках присутствуют как гексаэдральные, так и тетраэдральные элементы ([7]). Для обеспечения круговой периодичности боковые поверхности секторов имеют одинаковое разбиение, позволяющее обеспечить сопоставление соответствующих узлов элементов этих двух поверхностей. При разбиении размер элементов у пристеночных областей выбирался исходя из критерия y^+ в соответствии с используемой в последующем расчёте модели турбулентности ([8]).

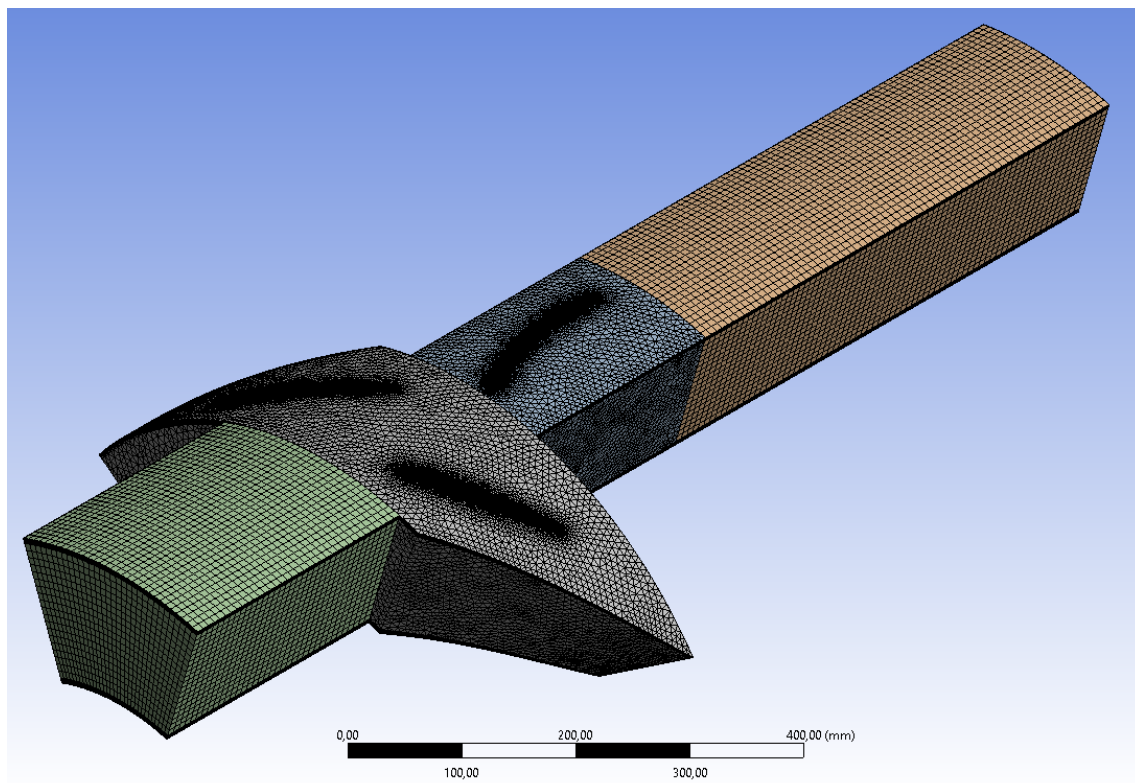


Рис. 3. Сеточная модель проточной части осевого вентилятора ЦАГИ ОВ-103 (РК+СА)

Полученная сеточная модель была импортирована в программу ANSYS CFX. Для расчета характеристик потока в проточной части вентилятора решаются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, дополненные моделью турбулентности и замыкаемые уравнением неразрывности. Они имеют следующий вид [9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0,$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right),$$

где $\rho \overline{u'_i u'_j}$ – тензор Рейнольдсовых напряжений.

Для численного решения уравнений в Ansys CFX используется метод контрольных объемов. Течение моделировалось как стационарное, несжимаемое, турбулентное. Использовалась двухпараметрическая $k-\varepsilon$ модель турбулентности ([10]).

Входные и выходные области расчетной схемы, а также область СА заданы неподвижными. Область колеса задана вращающейся с частотой 1200 об/мин. Для обеспечения неподвижности стенки корпуса в области рабочего колеса, задано ее вращение в противоположную сторону с той же частотой. Для сопряжения вращающейся и неподвижных расчетных областей входа, колеса, спрямляющего аппарата и выхода применен способ осреднения параметров по окружному направлению (stage mixing) между расчетными областями.

Граничные условия на входе определялись объёмным расходом Q , м³/с, на выходе – нулевым средним статическим давлением. Плотность воздуха принималась равной 1,2 кг/м³. На рис. 4 Показаны положения лопаток с направлениями вращения (н.в.) и соответствующие им направления потока (н.п.), для которых были рассчитаны характеристики. Рассматривались прямые (рис. 4 А, б) и реверсивные (рис. 4 в, г) режимы работы с обычным (рис. 4 а, в) и поочередно развернутым (рис. 4 б, г) положениями лопаток РК.

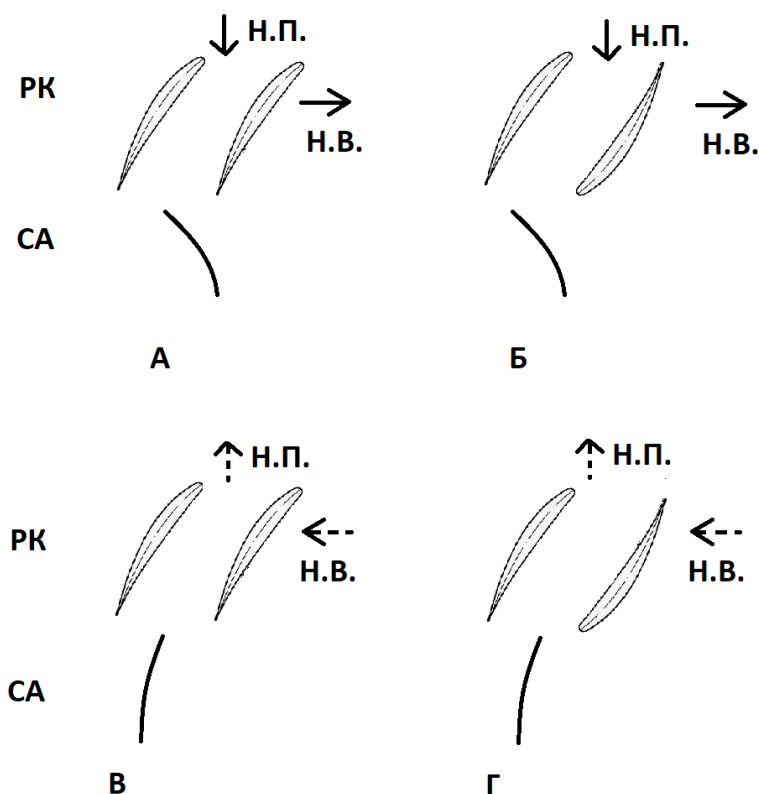


Рис. 4. Положения лопаток в лопаточных венцах рассматриваемого вентилятора

Расчет характеристики по плоской решетке на среднем радиусе.

Для проверки корректности решения в трёхмерной постановке были рассмотрены углы поворота потока $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ и потери давления ξ при течении в плоской решётке, составленной из профилей на среднем радиусе лопаточного венца РК. На рис. 5 показана часть плоской решётки с двумя профилями лопатки и треугольниками скоростей на входе и выходе из решётки. β_1 и β_2 – углы входа потока в решётку и выхода из неё соответственно в относительном движении, δ_1 – угол входа потока в решётку в абсолютном движении. При отсутствующем НА он равен 90° .



Рис. 5. Плоская решетка, составленная из профилей лопаток РК

Для определения параметров потока в плоской постановке в программе ANSYS Fluent была создана сеточная модель с контрольными элементами, показанная на рис. 6.

Коэффициент давления рассчитывался по безразмерной формуле Эйлера для турбомашин:

$\psi = 2(1 - \xi)\bar{r}\phi_a(\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2)$, где ξ – коэффициент потерь полного давления в решётке, $\bar{r}$ – относительный средний радиус вентилятора, ϕ_a – относительная осевая скорость потока в решётке.

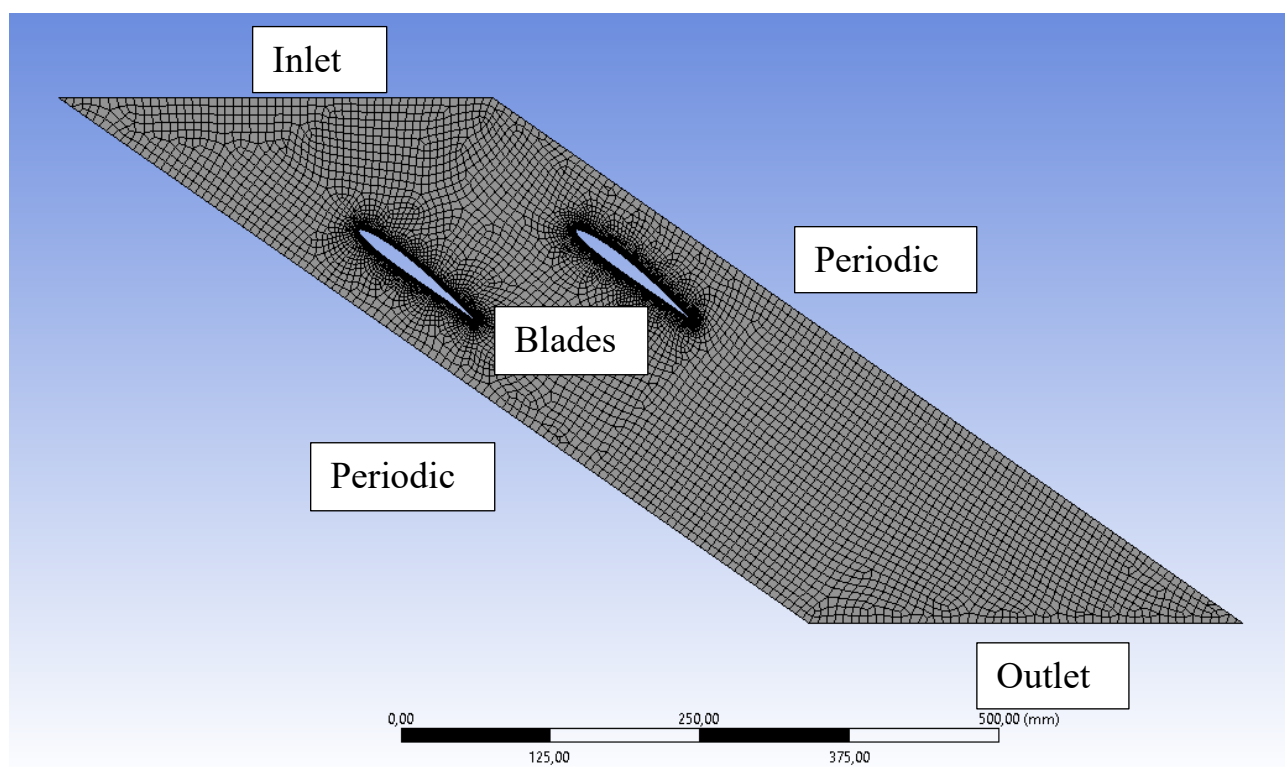


Рис. 6. Сеточная модель плоской решетки

Результаты

На рисунках 7 – 10 показаны вычисленные характеристики вентилятора с различным положением лопаток. Экспериментальные характеристики исходной схемы показаны кривой сплошной линией. Расчётные характеристики, полученная из трёхмерного расчёта, отмечены круглыми точками, а квадратными – результат двумерного расчёта.

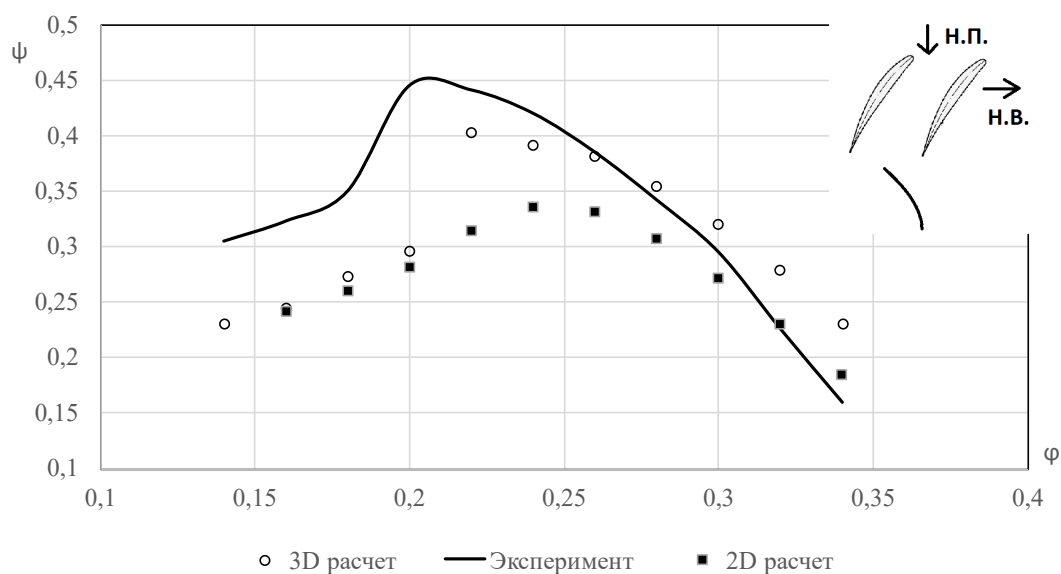


Рис. 7. Аэродинамические характеристики схемы вентилятора ОВ-103 (РК+СА) в прямом режиме работы

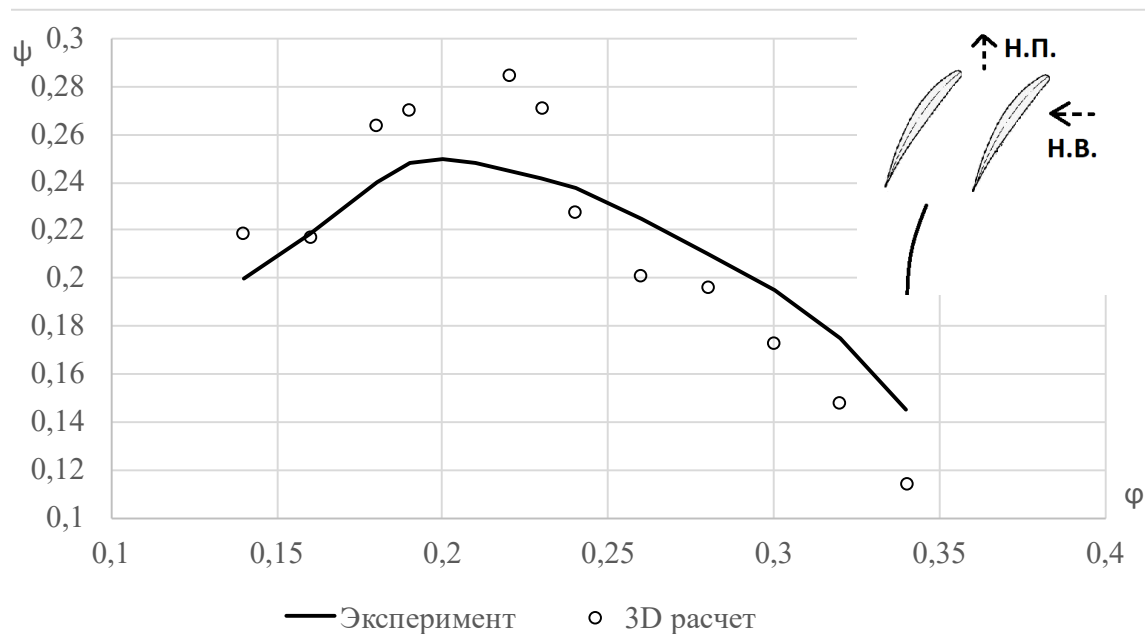


Рис. 8. Аэродинамические характеристики схемы вентилятора ОВ-103 (РК+СА) в реверсивном режиме работы

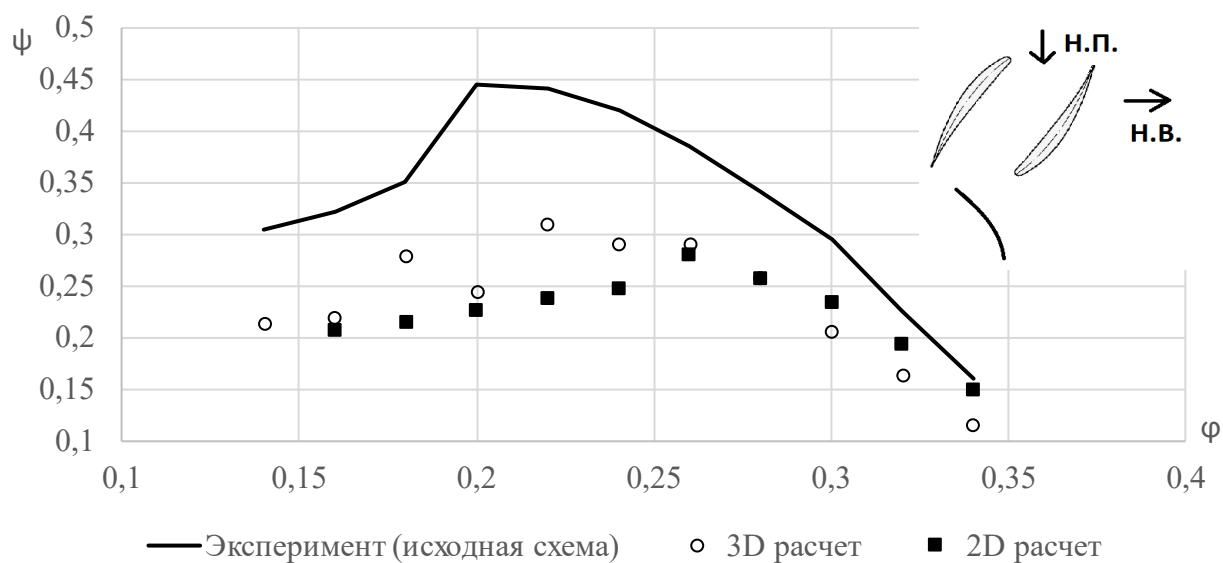


Рис. 9. Аэродинамические характеристики схемы вентилятора ОВ-103 (РК+СА) в прямом режиме работы с развернутыми поочередно на 180° лопатками РК

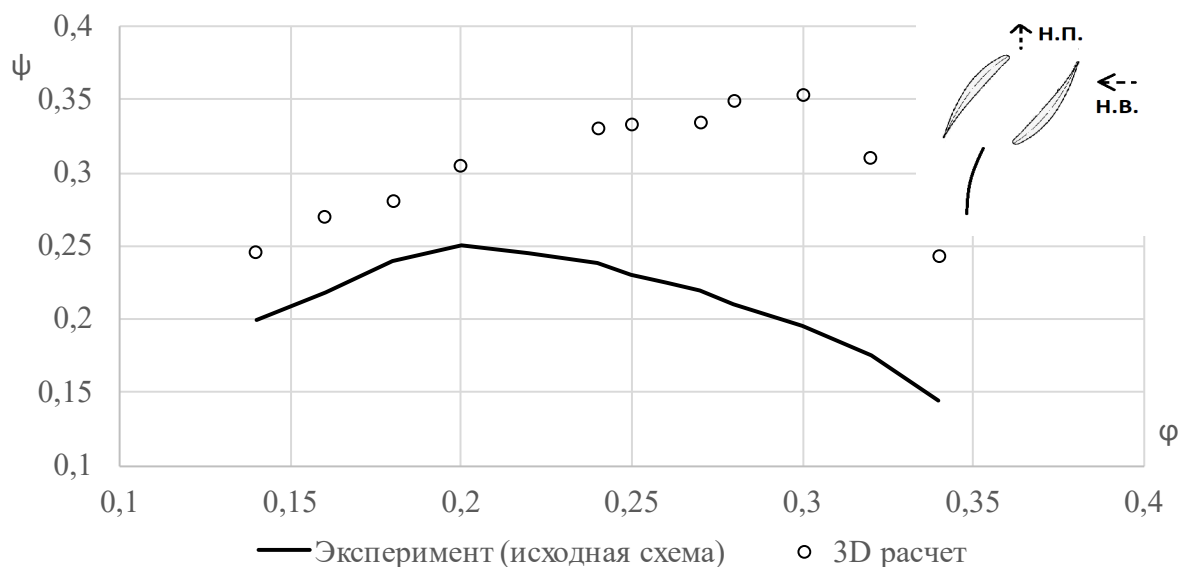


Рис. 10. Аэродинамические характеристики схемы вентилятора ОВ-103 (РК+СА) в реверсивном режиме работы с развернутыми поочередно на 180° лопатками РК

Обсуждение

Рассчитанные характеристики вместе с экспериментальными данными сведены вместе на рисунке 11.

Кривой, пересекающей все характеристики, показана зависимость сопротивления сети от расхода. Сеть выбрана из условия наиболее эффективной работы вентилятора с исходной аэродинамической схемой в прямом режиме. Из рисунка видно, что коэффициент расхода прямого режима исходного вентилятора составляет $\varphi=0,26$. При развороте половины лопаток РК на 180° коэффициент расхода прямого режима снижается до $\varphi=0,225$. При развороте лопаток производительность в режиме реверсирования значительно увеличилась и составила $\varphi=0,245$ по сравнению с исходной конфигурацией, которая обеспечивает коэффициент расхода равный $\varphi=0,21$.

Прямой режим работы вентилятора с половиной лопаток РК развёрнутой на 180° обладает наименьшей максимальной производительностью по сравнению с другими конфигурациями (его характеристика пересекает ось абсцисс ранее других).

Черными точками на кривых графика показаны точки максимальных КПД соответствующих им режимов. Значения КПД для исходной схемы взяты из [6], а данные для измененной схемы являются расчетными. Для прямого режима измененной схемы максимальный КПД составил $\eta=0,74$ при $\varphi=0,28$. Для реверсивного режима измененной схемы максимальный КПД составил $\eta=0,68$ при $\varphi=0,3$. По экспериментальным данным, полученным для исходной схемы вентилятора ЦАГИ ОВ-103, КПД в прямом режиме равен $\eta=0,85$ при $\varphi=0,26$, а в реверсивном – $\eta\sim 0,4$ при $\varphi=0,24$.

Большее значение максимального расхода в реверсивном режиме измененной схемы по сравнению с прямым режимом исходной схемы объясняется наличием СА, развёрнутым в реверсивное положение и играющего роль НА.

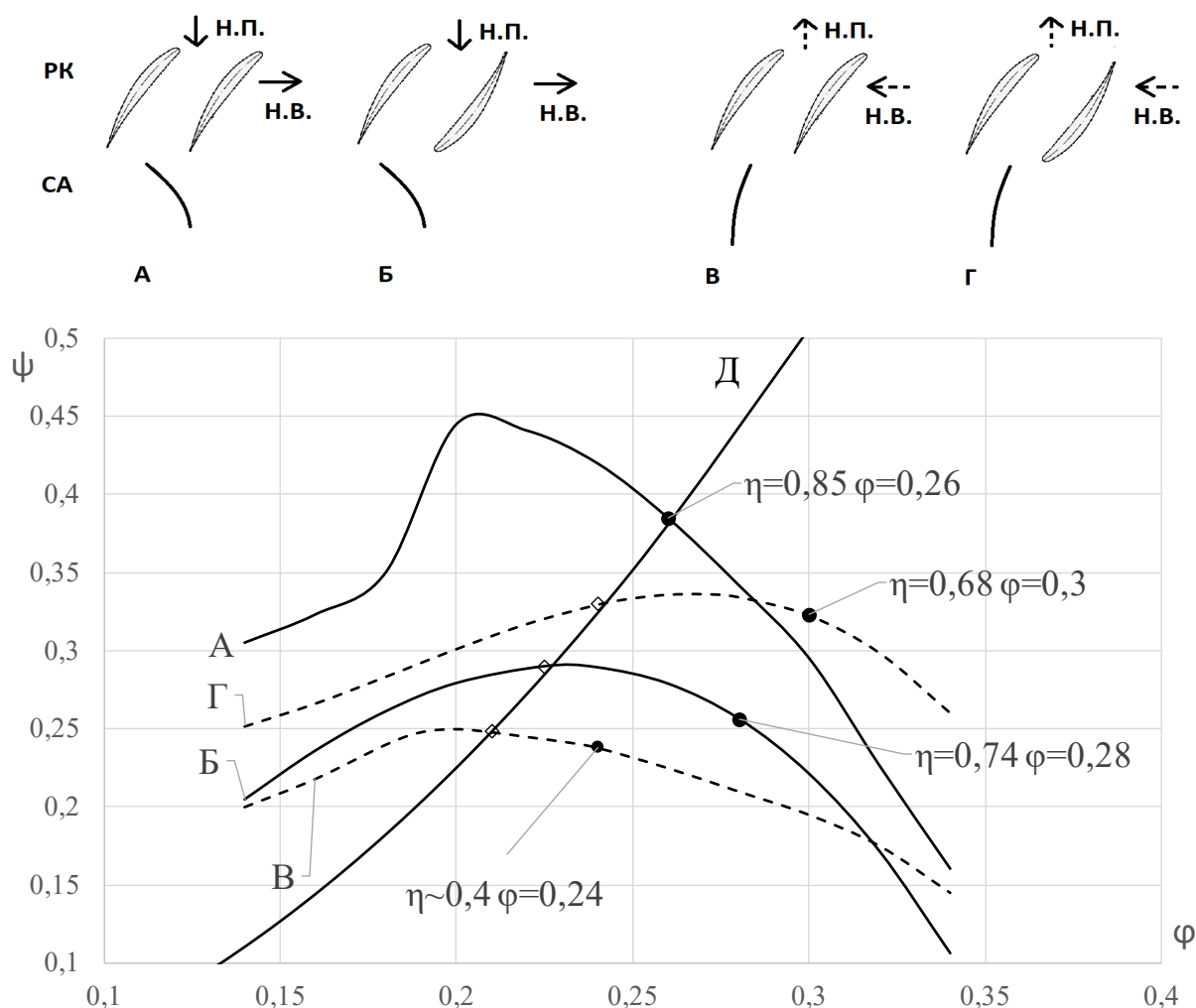


Рис. 11. Аэродинамические характеристики схемы вентилятора ОВ-103 (РК+СА): А –прямой режим, исходная схема (эксперимент), Б –прямой режим, схема с поочередно развёрнутыми лопатками (расчет), В –реверсивный режим, исходная схема (эксперимент), Г – реверсивный режим, схема с поочередно развёрнутыми лопатками (расчет), Д – сопротивление сети

Заключение

Был численно исследован способ повышения реверсивных качеств осевого вентилятора, предложенный Бычковым А.В. и заключающийся в поочередной установке лопаток РК на 180° . Исследования проведены на примере схемы ЦАГИ ОВ-103 (РК+СА). Показано, что такой способ реверсирования позволяет повысить производительность и уменьшить потери. Однако при этом эффективность и производительность прямого режима снижается.

Установка половины числа лопаток РК в развёрнутое на 180° положение позволила увеличить производительность вентилятора в реверсивном режиме на 17%, при работе вентилятора в сети, для которой эффективность прямого режима исходной схемы максимальна (т.е. рабочая точка вентилятора исходной схемы совпадает с точкой максимального КПД). При этом производительность прямого режима снизилась на 25%. Максимальный КПД в режиме реверсирования измененной схемы составил 68%, против $\sim 40\%$ при реверсировании осевого вентилятора исходной схемы. При этом КПД прямого режима снизился на $\sim 12\%$.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственной регистрации 126021217131-9).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 №507 // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору: офиц. сайт. URL: [https://www.gosnadzor.ru/industrial/coal/Acts/№ 507 от 08.12.2020.pdf](https://www.gosnadzor.ru/industrial/coal/Acts/№507%20от%2008.12.2020.pdf) (дата обращения: 13.05.2026)
2. Брусиловский И. В. Аэродинамический расчет осевых вентиляторов. – М.: Машиностроение, 1986. – 288 с.
3. Московко Ю. Г. Методика проектирования и разработка энергоэффективных осевых вентиляторов с профилями лопаток специальной формы: дис. канд. техн. наук. – СПб., 2011. – 134 с.
4. Грехнёва Е.Ю. Разработка аэродинамических схем с s-образными лопатками рабочих колес для реверсивных, неповоротно-лопастных осевых вентиляторов: Диссертация кандидата технических наук – Новосибирск., 2012. – 132 с.
5. Красюк А.М., Косых П.В. Аэродинамический расчет осевых, реверсируемых вращением направляющего аппарата // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – 2023 - №3 – 85-95 с.
6. Брусиловский И.В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. М.: Недра, 1978 – 198 с.
7. А.М. Молчанов, М.А. Щербаков, Д.С. Янышев, М.Ю. Куприков, Л.В. Быков Построение сеток в задачах авиационной и космической техники: учеб. пособие для студентов / А. М. Молчанов, М. А. Щербаков, Д. С. Янышев, М. Ю. Куприков, Л. В. Быков; МАИ – Москва, 2013. – 260 с., с ил.
8. Ю. В. Кожухов, С. В. Карташов, А. А. Аксенов, А. М. Яблоков, М. И. Соколов, Н. И. Садовский, Е. С. Зайцева Методика построения расчетных сеток лопаточных аппаратов энергетических турбомашин для моделирования вязкого потока: учеб. пособие / Ю. В. Кожухов [и др.]. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 98 с.
9. Wilcox DC. Turbulence Modeling for CFD (Third Edition). DCW Industries 2006 – 515 p
10. Батурин О.В., Батурин Н.В., Матвеев В.Н. Расчет течений жидкости и газа с помощью универсального программного комплекса Fluent. Учеб. Пособие. – Самара.: Изд-во Самар. гос. аэро-косм. Ун-та, 2009. – 151 с.

© П. В. Косых, С. С. Шевченко, 2026