

## Исследование аэродинамических схем реверсируемых шахтных вентиляторов

*П. В. Косых<sup>1\*</sup>, А. М. Красюк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: p.kosykh@yahoo.com

**Аннотация.** В статье рассмотрена аэродинамическая схема вентилятора главного проветривания с высокими аэродинамическими свойствами при реверсивном режиме работы на основе использования вращающегося входного направляющего аппарата. Выявлены зависимости углов установки лопаток входного направляющего аппарата и рабочего колеса, при переводе вентилятора в реверсивный режим работы, от требуемых коэффициентов расхода и давления вентилятора при определённых параметрах решёток профилей на среднем радиусе. На примере рассчитанных аэродинамических схем показано влияние закрученности потока в направляющем аппарате, густоты лопаточной решётки венцов и крученности лопаток на аэродинамическую характеристику реверсивного режима работы вентилятора, вычисленное в программном комплексе ANSYS CFX. Получена схема, обеспечивающая производительность в реверсивном режиме работы вентилятора равную 0,96 от производительности прямого режима в той же сети.

**Ключевые слова:** вентилятор главного проветривания, осевой реверсивный вентилятор, направляющий аппарат, аэродинамическая схема

## Investigation of aerodynamic schemes of reversible mine fans

*P. V. Kosykh<sup>1\*</sup>, A. M. Krasnyuk<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\*e-mail: p.kosykh@yahoo.com

**Abstract.** The article considers the aerodynamic scheme of the main ventilation fan with high aerodynamic properties in reverse operation mode based on the use of a rotating input guide vanes. The dependences of the setup angles of the blades of the input guide vanes and the rotor, when the fan is switched to the reverse mode, on the required flow coefficients and fan pressure at certain parameters of the profile cascades at a mean radius are revealed. Using the example of the designed aerodynamic schemes, the influence of the swirl of the flow in the guide device, the solidity of the blade cascades of the rotors and the torsion of the blades on the aerodynamic characteristics of the reversible fan operation mode, calculated in the ANSYS CFX, is shown. Obtained fan aerodynamic scheme provides a performance in the reverse mode operation equal to 0.96 of the performance of the direct mode in the same ventilation network.

**Keywords:** main ventilation fan, axial reversible fan, inlet guide vanes, aerodynamic scheme

### *Введение*

Согласно правилам безопасности, вентиляторы главного проветривания шахт и рудников должны обеспечивать подачу воздуха в реверсивном режиме не менее 0,6 от производительности прямого режима [1]. Наиболее технически простым способом реверсирования осевого вентилятора является изменение направ-

ления вращения рабочего колеса (РК) с поворотом лопаток аппаратов в реверсивное положение. Но создание таких осевых вентиляторов, работающих эффективно (с высоким КПД и в зоне устойчивой работы) в прямом и реверсивном режимах связано с определёнными трудностями. Чем совершеннее профиль лопаток рабочего колеса и выше его КПД при номинальном режиме работы, тем ниже КПД при реверсивном режиме работы вследствие потерь энергии, связанных с отрывом потока при обтекании изогнутой поверхности [2]. В некоторых случаях для повышения эффективности реверсивного режима применяют лопатки со специальной формой профиля [3, 4], но это также может снизить эффективность прямого режима. Поскольку большую часть срока службы вентилятор работает в прямом режиме, то "жертвовать" высоким КПД для повышения производительности при реверсе весьма нерационально. Существуют и другие, более совершенные аэродинамические способы реверсирования [5], в основе которых лежит поворот лопаток РК на углы, превышающие  $90^\circ$ , однако реализующие их конструкции вентиляторов более сложны, имеют меньшую надёжность и применяемый зачастую в них подвижный перестановочный механизм может иметь большую массу, что вызывает трудности балансировки ротора в разных положениях.

В любом случае, следует понимать, что вентилятор, позволяющий обеспечить бóльшую производительность в реверсивном режиме работы при прочих равных характеристиках, более предпочтителен для аварийных режимов. В связи с этим задача разработки энергоэффективных вентиляторов, обеспечивающих как можно больший расход в реверсивном режиме при высокоэффективной работе в прямом режиме является весьма актуальной.

Ранее авторами были выполнены исследования по обоснованию и разработке аэродинамических схем реверсивных осевых вентиляторов, защищенных патентом РФ № 2726239 [6]. Особенностью этих схем (под аэродинамической схемой, так же, как и в [7], понимается совокупность признаков и параметров, однозначно характеризующих проточную часть осевого вентилятора), является то, что они выполнены с двумя рабочими колесами (РК), одно из которых в прямом режиме неподвижно и играет роль входного направляющего аппарата (ВНА). При реверсировании оно приводится во вращение с направлением вращения, обратным прямому, а второе РК останавливается и выполняет роль ВНА (далее ВНА и РК в реверсивном режиме будут обозначаться как  $РК^-$  и  $ВНА^-$  соответственно). Кинематическая схема рассматриваемого вентилятора показана на рис. 1. При реверсировании лопатки рабочих колес следует повернуть на определённые углы  $\Delta\theta_{ВНА}$  и  $\Delta\theta_{РК}$  (рис. 2), необходимые для эффективной работы вентилятора. В настоящей работе речь пойдёт об исследовании влияния ряда конструктивных и аэродинамических параметров на аэродинамические характеристики таких схем.

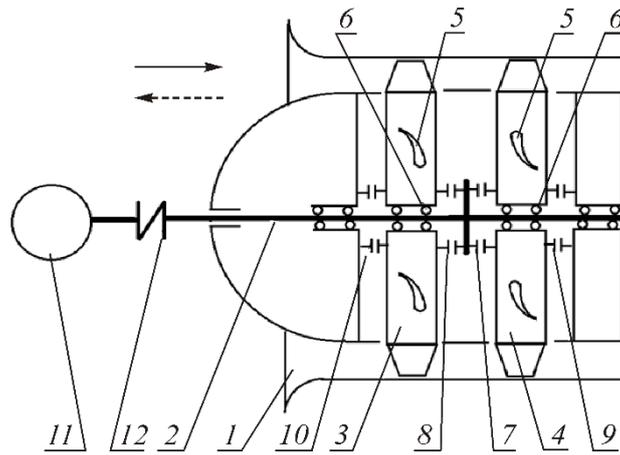


Рис. 1. Кинематическая схема реверсивного вентилятора:

1 — корпус; 2 — вал; 3 — колесо ВНА; 4 — РК; 5 — лопатки; 6 — подшипники; 7, 8 — управляемые муфты; 9, 10; — тормозные устройства; 11 — электродвигатель; 12 — муфта

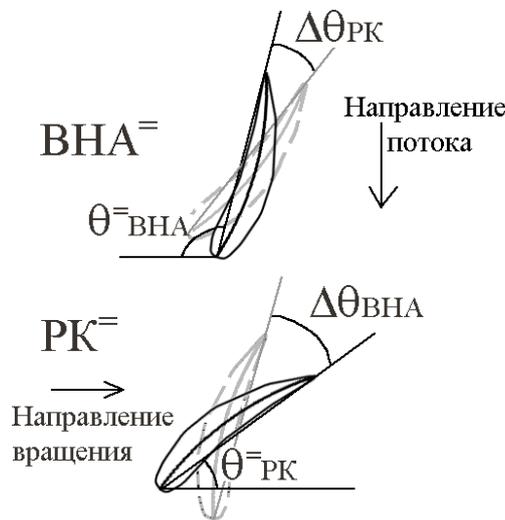


Рис. 2. Углы поворота лопаток при переходе в реверсивный режим. Серые пунктирные линии – положения профилей лопаток в прямом режиме работы, черные сплошные – в реверсивном режиме

### Методы и материалы

Для определения углов поворота лопаток РК и ВНА при реверсировании была разработана методика, суть которой сводится к следующему. Пусть дана аэродинамическая схема вентилятора ВНА + РК с колесами радиуса  $r$  и втулочным отношением  $\nu$ . Для неё известны геометрические параметры профилей лопаток ВНА и РК (рис. 3) на среднем радиусе  $\bar{r} = \sqrt{(1+\nu^2)}/2$ , которые включают: относительный прогиб профиля  $\bar{f} = f/b$ , относительную величину хорды  $\bar{b} = b/r$ , относительную толщину профиля  $\bar{c} = c/b$ , угол установки профиля  $\theta$ , а также густоту решётки  $\tau = t/b$ , которая составлена из этих профилей (здесь используются те же обозначения, что и в [8]). Также известны требуемые коэффициенты

теоретического давления  $\psi^{\bar{}}_T$  и расхода  $\phi^{\bar{}}$  в реверсивном режиме, которые вентилятор должен обеспечивать при соответствующих им углах входа воздушного потока в решётку ВНА  $\delta^{\bar{}}_0$  и РК  $\beta^{\bar{}}_1$ , и выхода из них  $\delta^{\bar{}}_1$  и  $\beta^{\bar{}}_2$  соответственно. При этом определённому расходу соответствует определённый коэффициент среднерасходной осевой скорости  $\phi^{\bar{}}_a = \phi^{\bar{}} / (1 - v^2)$ . В расчётной точке коэффициент осевой скорости принимается равным коэффициенту среднерасходной осевой скорости:  $c^{\bar{}}_a = \phi^{\bar{}}_a$ .

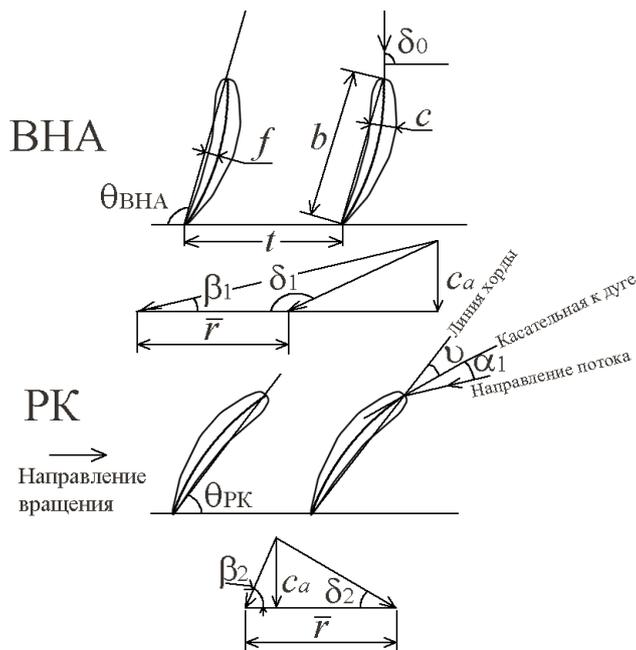


Рис. 3. Треугольники скоростей воздушного потока в решётках ВНА и РК в прямом режиме работы

На рис. 3 показаны углы и треугольники скоростей для прямого режима работы. В реверсивном режиме они выглядят аналогично, но поток входит в решётку со стороны острой кромки профиля. Принимается, что в решётку ВНА<sup>-</sup> поток входит параллельно оси вращения вентилятора ( $\delta^{\bar{}}_0 = 90^\circ$ ), а углы атаки  $\alpha^{\bar{}}_1$  у носика профиля РК<sup>-</sup> задаются равными или близкими к нулю, как это рекомендовано при проектировании [8]. Это даёт возможность определить угол поворота лопаток РК -  $\Delta\theta_{РК} = \theta^{\bar{}}_{ВНА} - \theta_{РК}$ , где  $\theta^{\bar{}}_{ВНА} = 90^\circ - v - \alpha^{\bar{}}_{1ВНА}$ . Затем, зная полученные геометрические параметры решётки ВНА<sup>-</sup> на среднем радиусе (они будут теми же, что и у решётки РК за исключением угла установки), определяются угол выхода потока  $\delta^{\bar{}}_1$  из неё, который, в свою очередь определяет угол входа в решётку РК<sup>-</sup>  $\beta^{\bar{}}_1$ . Для определения этих углов используются теоретические зависимости для плоских решёток, приведённые в [8]. После определения угла поворота лопаток РК, требуется определить угол установки  $\theta^{\bar{}}_{РК}$  профилей в решётке РК<sup>-</sup>, поворачивающей поток на необходимый угол  $\beta^{\bar{}}_2 - \beta^{\bar{}}_1$ . При этом, поскольку изменяется только угол установки лопаток ВНА, все остальные геометрические параметры

его решётки являются известными. Угол  $\theta_{\text{РК}}^-$  находится по теоретическим зависимостям, упомянутым выше, так, чтобы при известных  $\delta_l, \bar{r}, \bar{b}, \bar{f}, \bar{c}, \tau$  и  $\bar{c}_a$ , поток выходил из решётки РК<sup>-</sup> с углом  $\beta_2^-$ , который соответствует требуемому коэффициенту давления  $\psi^-$ . Определение угла  $\theta_{\text{РК}}^-$  равносильно задаче профилирования лопаток при известных геометрических параметрах их профилей кроме угла установки. Решение задачи профилирования лопаток описано в [8] и здесь не приводится. После того, как найден  $\theta_{\text{РК}}^-$ , угол поворота лопаток ВНА может быть определён как  $\Delta\theta_{\text{ВНА}} = 180^\circ - \theta_{\text{РК}}^- - \theta_{\text{ВНА}}$ .

Для проведения исследований на конкретных аэродинамических схемах была использована вышеупомянутая методика профилирования лопаточных венцов осевых вентиляторов.

С помощью неё были определены конструктивные параметры лопаток исследуемых схем.

Для получения аэродинамических характеристик исследуемых осевых вентиляторов использовалась программа ANSYS CFX, реализующая численное моделирование установившегося трёхмерного течения воздушного потока в осевых турбомашинах методом контрольных объёмов.

### Результаты

Оценены величины углов, на которые надо повернуть лопатки, чтобы выполнить условия плавности входа потока в решётки и обеспечить при этом требуемое давление в реверсивном режиме работы. На рис. 5 приведены зависимости углов поворота лопаток ВНА и РК, обеспечивающие такое же, как и в прямом режиме, теоретическое давление. При этом густота решеток принята за 1,0, а втулочное отношение вентилятора равно 0,6.

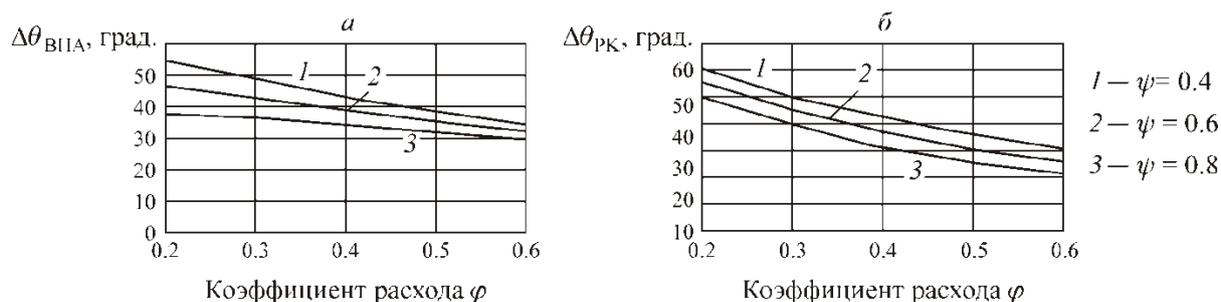


Рис. 5. Расчётные зависимости углов поворота лопаток ВНА (а) и РК (б), обеспечивающих в реверсе те же параметры вентилятора, что и в прямом режиме работы, от коэффициента расхода  $\varphi$  для различных коэффициентах теоретического давления  $\psi, \nu = 0,6$

Диапазоны углов поворота лопаток составили:  $30 - 60^\circ$  для лопаток входного направляющего аппарата и  $20 - 65^\circ$  для лопаток рабочего колеса, необходимые для эффективного реверсирования по предлагаемому способу. При этом зависимость углов поворота лопаток от коэффициентов расхода и давления вы-

ражается в уменьшении первых при увеличении вторых, что иллюстрируется графиками на рис. 5. Полученные интервалы относятся к вентиляторам со втулочным отношением 0,6 и коэффициентами расхода  $\varphi$  от 0,2 до 0,6 и давления  $\psi$  от 0,4 до 0,8. Принято, что коэффициент давления отличается от теоретического коэффициента давления в 0,87 раза для учёта потерь давления, как это принимается в методике расчёта лопаточных венцов [8].

Рассчитано несколько аэродинамических схем вентиляторов на параметры в рабочей точке расход  $Q = 230 \text{ м}^3/\text{с}$ , полное давление  $P_v = 6500 \text{ Па}$ , диаметр  $D = 2,4 \text{ м}$ , частоту вращения  $n = 1000 \text{ об/мин}$  (безразмерные параметры  $\varphi = 0,4$ ,  $\psi = 0,7$ ) с втулочным отношением  $\nu = 0,6$ . Эти схемы использованы для исследования влияния таких расчётных параметров как густота решётки ВНА  $\tau_{\text{ВНА}}$  на среднем радиусе, угол атаки  $\alpha_{1\text{ВНА}}$  на входе в решётку ВНА в прямом режиме на среднем радиусе, закрученность лопаток ВНА и РК, а также закрученности потока в ВНА  $n_1 = \text{ctg}\delta_1 / (\text{ctg}\delta_2 - \text{ctg}\delta_1)$ . Лопатки выполнены листовыми. Число лопаток ВНА – 18, рабочего колеса – 16. Результаты расчёта приведены на рисунке 6, где различные кривые соответствуют характеристикам схем с расчётными параметрами: 1 –  $n_1 = -0,5$ ,  $\tau_{\text{ВНА}} = 0,87$ ; 2 –  $n_1 = -0,7$ ,  $\tau_{\text{ВНА}} = 1,2$ ; 3 –  $n_1 = -0,5$ ,  $\tau_{\text{ВНА}} = 1,2$ ; 4 –  $n_1 = -0,5$ ,  $\tau_{\text{ВНА}} = 0,87$ ,  $\alpha_{1\text{ВНА}} = -3^\circ$ ; 5 –  $n_1 = -0,5$ ,  $\tau_{\text{ВНА}} = 0,87$ , некручённый ВНА; 6 –  $n_1 = -0,3$ ,  $\tau_{\text{ВНА}} = 0,87$ . Линия 7 – аэродинамическая характеристика расчетной сети.

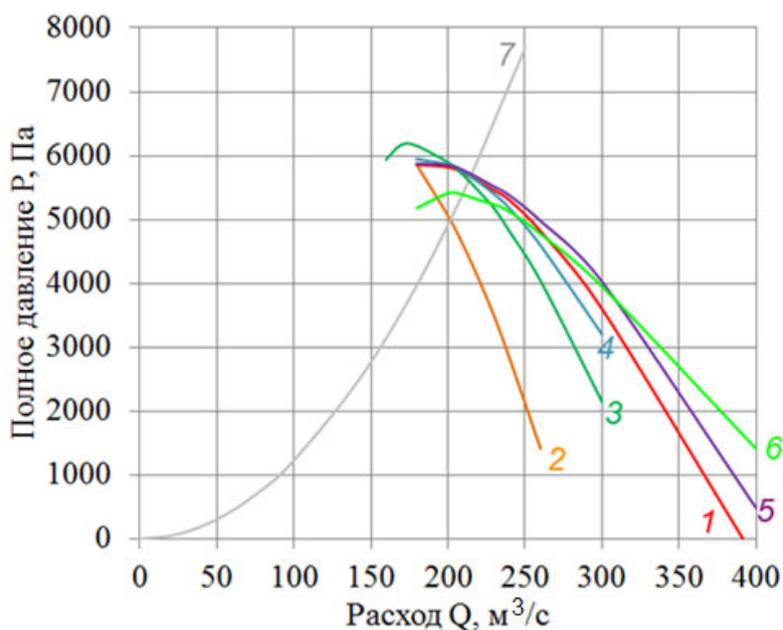


Рис. 6. Аэродинамические характеристики реверсивного режима вентиляторов, рассчитанных на рабочую точку  $Q = 230 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $P = 6500 \text{ Па}$ .

### Обсуждение

Полученные расчётные зависимости углов поворота лопаток при реверсе (рис. 5) позволяют оценить необходимый угол поворота лопаток для эффективного реверса ещё на этапе проектирования вентилятора и принять необходимые

конструкторские решения. Это также важно для случая, когда предполагается использовать одну и ту же конструкцию вентилятора для разных аэродинамических схем, которые на момент разработки вентилятора ещё не созданы, однако уже известны аэродинамические параметры области их работы.

Эти же зависимости показывают, что углы поворота лопаток во всём диапазоне расходов достаточно малы по сравнению с углами поворота как при реверсировании с полным разворотом лопаток рабочего колеса на  $180^\circ$  и изменением направления вращения, так и при менее совершенном способе реверсирования с разворотом лопаток РК на  $180^\circ - (\theta_K + \theta_K^-)$  без изменения направления вращения [8], что позволяет использовать более простые технические решения. Кроме этого, нужно заметить, что важным преимуществом рассматриваемого способа реверсирования, по сравнению с вышеперечисленными, является необходимость балансировки роторов только в одном положении лопаток и перестановочного механизма.

По результатам расчёта аэродинамических характеристик (рис. 6) ряда схем, отличающихся тем или иным расчётным параметром, можно заметить следующее:

- все схемы при работе вентилятора в той же сети обеспечивают подачу свыше 0,87 от прямого режима, а наилучшая из них – 0,96;

- увеличение густоты решетки ВНА в рассмотренном диапазоне (от 0,87 до 1,2) приводит к увеличению максимального давления, развиваемого вентилятором в реверсивном режиме работы, уменьшению максимального расхода при нулевом полном давлении, расширению рабочей области в интервале расходов меньших расчётного. Наклон кривой аэродинамической характеристики становится круче. Расход в расчётной сети, практически, сохраняется (сравнение кривых 1 и 3).

Уменьшение углов атаки при входе воздушного потока в решётку ВНА незначительно увеличивает максимальное давление в реверсивном режиме работы, но уменьшает максимальный расход при нулевом полном давлении. Наклон характеристики становится круче. Расход в расчётной сети сохраняется (сравнение кривых 1 и 4).

Применение некрученных лопаток ВНА увеличивает давление вентилятора в рабочей области реверсивного режима работы. Также увеличивается максимальный расход в рабочей области. Расход в расчётной сети сохраняется (сравнение кривых 1 и 5). Можно рекомендовать всегда применять некручёные лопатки ВНА при рассматриваемом способе реверсирования.

Применение некрученных лопаток РК, практически, не изменяет аэродинамической характеристики вентилятора в реверсивном режиме, но, как известно, существенно ухудшает КПД прямого режима (см. [10]);

Изменение закрученности потока  $n_l$  в ВНА неоднозначно изменяет аэродинамическую характеристику реверсивного режима. В рассмотренных случаях изменение закрученности потока в любую сторону от -0,5 уменьшило расход, обеспечиваемый вентилятором в сети. При этом уменьшение закрученности сделало

кривую давления вентилятора более пологой и увеличило максимальный расход в рабочей области (сравнение кривых 1, 2 и 6).

### ***Заключение***

Выявлено, что для эффективного реверсирования режима работы осевого вентилятора по рассматриваемому способу нужно поворачивать лопасти не более, чем на 65° для ВНА, и на 60° для РК.

При разработке схем вентиляторов, реверсируемых рассмотренным способом, рекомендуется применять некрученые лопасти ВНА. Для уменьшения крутизны характеристики следует стремиться к меньшей густоте решетки ВНА.

### ***Благодарности***

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ номер гос. регистрации № 121052500147-6

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила безопасности в угольных шахтах”. Сер. 05. Вып. 40. — М.: ЗАО “Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности”, 2017. — 198 с.
2. Левин Е.М. Эффективность реверсирования шахтных осевых вентиляторов изменением направления вращения. – Научные труды. М.: Изд-во Московского института радиоэлектроники и горной электромеханики, 1962 – с.125 - 135
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. Грехнева Е. Ю. Разработка аэродинамических схем с S-образными лопатками рабочих колес для реверсивных, неповоротно-лопастных осевых вентиляторов: дис. ... канд. техн. Наук. — Новосибирск., 2012. — 132 с.
5. Носырев Б. А., Белов С. В. Вентиляторные установки шахт и метрополитенов / Учеб. пособие. — Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2000. — 278 с.
6. Пат. 2726239 РФ. Способ реверсирования вентилятора с двумя рабочими колесами / А. М. Красюк, И. В. Лугин, П. В. Косых // Оpubл. в БИ. — 2020. — № 19.
7. Брусиловский И.В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. М.: Недра, 1978 – 198 с.
8. Брусиловский И.В., Аэродинамический расчет осевых вентиляторов. – М.: Машиностроение, 1986. – 288 с.
9. Брусиловский И.В. Аэродинамика осевых вентиляторов. М.: Машиностроение, 1984 – 240 с.

© П. В. Косых, А. М. Красюк, 2022