

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШАХТНОГО ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА ПРИ РАБОТЕ В РЕВЕРСИВНОМ РЕЖИМЕ

*Павел Владимирович Косых*

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091 Россия, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 54, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, т. +7 (383) 205–30–30, p.kosykh@yahoo.com

В статье описан порядок определения приближённой аэродинамической характеристики вентилятора, работающего в реверсивном режиме с обратным направлением вращения рабочего колеса и развёрнутым положением лопаток спрямляющего аппарата. Для расчёта аэродинамической характеристики использованы результаты вычислительного моделирования обтекания плоской решётки, составленной из профилей лопаток вентилятора. Для проверки адекватности применяемых расчётных моделей проведены сравнения углов отклонения потока и потерь полного давления при обтекании плоских решёток в прямом режиме, составленных из профилей NACA65, с известными экспериментальными данными. На примере вентилятора, выполненного по схеме ЦАГИ ОВ-103, с известной экспериментально полученной аэродинамической характеристикой реверсивного режима, рассчитаны углы отклонения реверсивного потока в решётке на среднем радиусе и потери полного давления в ней. Полученные данные использованы для расчёта значений коэффициента полного давления вентилятора в зависимости от коэффициента расхода воздуха, протекающего через вентилятор. В полученных характеристиках значение максимального коэффициента расхода получилось большим, чем в экспериментальных. Однако при этом оно ближе к полученным экспериментально, чем рассчитываемые по известным теоретическим характеристикам плоских решёток.

**Ключевые слова:** вентилятор главного проветривания, осевой реверсивный вентилятор, аэродинамическая характеристика вентилятора

## DETERMINING THE AERODYNAMIC CHARACTERISTIC OF A MINE AXIAL FAN WHEN OPERATING IN REVERSIBLE MODE

*Pavel V. Kosykh*

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher, office: +7 (383) 205–30–30, e-mail: p.kosykh@yahoo.com

This paper describes the procedure for determining the approximate aerodynamic characteristics of a fan operating in a reversible mode with the reverse direction of impeller rotation and deployed position of the straightener blades. To calculate the aerodynamic characteristic, the results of computational modeling of the flow around a flat cascade of airfoil blades were used. To check the adequacy of the applied design models, the comparison of flow deflection angles and total pressure losses when flowing around flat cascades composed of NACA65 airfoils in the direct mode and the known experimental data was made. Using the example of a OV-103 fan made according to the design of Central Institute of Aerohydrodynamics, with the known experimentally obtained aerodynamic characteristic of the reversible mode, the angles of reverse flow deflection in a cascade at the middle radius and total pressure loss in it were calculated. The obtained data were used to calculate the values of the coefficient of total fan pressure depending on the flow rate of air flowing through the fan. The obtained characteristics showed the value of maximum air flow rate higher than in the experimental characteristics. But in this case, it is closer to experimentally obtained data than the value calculated from the known theoretical characteristics of flat cascades.

**Keywords:** main fan, axial reversible fan, aerodynamic characteristic

## *Введение*

Согласно нормам безопасности, вентилятор главного проветривания, работающий в шахте или руднике в реверсивном режиме работы должен обеспечивать подачу воздуха, составляющую как минимум 60% от объёма, подаваемого им в прямом режиме [1]. Технически самым простым способом реверсирования осевого вентилятора является перемена направления вращения рабочего колеса с разворотом лопаток аппаратов в реверсивное положение. Такой способ широко применяется для реверсирования шахтных и тоннельных осевых вентиляторов главного проветривания. Для этого не требуется специальных механизмов или устройств реверсирования, однако при этом зачастую значительно снижается КПД вентилятора. Кроме того, таким способом реверсируются струйные осевые вентиляторы [2].

При создании аэродинамической схемы осевого вентилятора для повышения его реверсивного качества прибегают к специальным мерам. Для проектируемых реверсивных вентиляторов могут применяться лопатки с определенной формой средней линии профиля (например, S-образные лопатки [3, 4]), симметричные профили [5, 6], профили с уменьшенным изгибом средней линии [7].

Уменьшение изгиба средней линии профиля лопатки сопряжено с увеличением углов атаки в рабочей точке в прямом режиме, что может приводить к уменьшению КПД вентилятора в ней. Однако при этом он позволяет уменьшить потери давления и увеличить углы отклонения потока в решётке профилей при реверсировании, поскольку известно ([7, 8]), что в реверсивном режиме большие углы атаки и несоответствие направления поворота потока изгибу профилей являются главными причинами больших потерь давления в такой решётке.

При создании аэродинамической схемы шахтного осевого вентилятора, от которого реверсивная работа требуется только в случае аварийного режима, и реверсируемого обратным направлением вращения рабочего колеса, необходимо стремиться к обеспечению максимального КПД в рабочей области при обеспечении требуемого минимума расхода в реверсивном режиме работы. Не лишено смысла ещё на этапе проектирования аэродинамической схемы такого вентилятора определять параметры его реверсивной характеристики. Известный метод [7] оценки реверсивных качеств решёток профилей аэродинамических схем состоит в определении теоретических характеристик решёток (углов отклонения потока) по известным [9] аналитическим зависимостям. Для этого диффузорную решётку рабочего колеса при реверсивном обтекании рассматривают как конфузорную, работающую, однако, в вентиляторном режиме, и принимают, что зависимость угла отклонения потока в такой решётке линейна и такая же, как и для конфузорного режима. При этом рассматривают решётку на среднем радиусе вентилятора, делящим проточную часть на два кольца равной площади. Осевые скорости потока во всех сечениях принимают равными осредненной по расходу.

Проблема такого метода в том, что он не позволяет учесть потери полного давления в решётке, которые достигают значительных величин. В [7] приводятся данные, что коэффициент силы лобового сопротивления профиля в решётке при

реверсивном режиме обтекания более, чем в 5 раз превосходит таковой в прямом режиме. Современные численные методы решения задач аэродинамики позволяют определять углы поворота потока в решётках и потери давления в ней с высокой точностью [10]. В некоторых методах возможен учёт шероховатости поверхности [11]. В связи с этим представляется интересным использовать численные методы для вычисления углов отклонения потока в плоской решётке профилей и потерь давления в ней при обтекании в реверсивном режиме (т.е. со стороны острой кромки), с последующим использованием этих данных для оценки полного давления вентилятора в реверсивном режиме.

### *Методы и материалы*

Рассмотрим задачу обтекания плоской решётки, обтекаемой в нормальном режиме, составленную из профилей типа *NACA 65*, для которых имеются обширные экспериментальные данные, полученные на основании продувок [12]. Особенностью этих испытаний являлось то, что решётка обдувалась с определённого угла входа потока  $\beta_1$ , при этом угол атаки менялся изменением угла установки профилей. В результате для широкого ряда решёток разных густот и кривизн средних линий их профилей, были получены, в частности, графики углов отклонения потока в решётке и коэффициентов лобового сопротивления в зависимости от углов атаки.

В программе *Ansys Fluent* были составлены конечно-объёмные сетки участка плоской решётки, содержащего один профиль *NACA 65* (рис.1). На верхнюю и нижнюю границы участка накладывались периодические граничные условия. Поток протекал от правой границе участка к левой. Число Рейнольдса составляло  $2,45 \cdot 10^5$ , рассчитанного по длине хорды лопатки. Расчёт проводился для ряда профилей *NACA 65* различных кривизн в решётках с различными густотами.

В расчётах применялись различные модели турбулентности, а именно модель *Спаларта – Аллмареса*, *k-ε* модель, *SST* модель *Ментера*. Следует отметить, что для каждой модели турбулентности требования к качеству пристеночного слоя, характеризуемой параметром  $y^+$ , различны [13, 14], поэтому для каждой модели сетка строилась с учётом этих требований, и в ходе вычислений контролировалось значение параметра  $y^+$ .

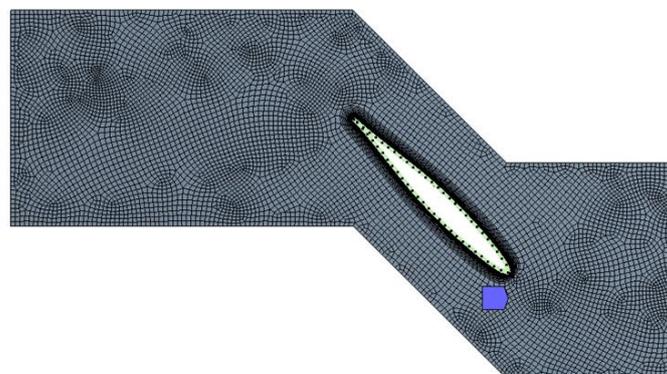


Рис. 1. Участок решётки с профилем *NACA 65-010* с контрольными объёмами

С учётом полученных результатов и сравнения их с экспериментальными данными, была составлена модель для расчёта параметров обтекания плоских решёток, составленных из профилей вентилятора аэродинамической схемы ЦАГИ ОВ-103, работающих в реверсивном режиме. Эта схема является одной из тех, которые были разработаны в ЦАГИ для реверсивных вентиляторов [15]. При их создании принимались меры для повышения реверсивных качеств, и, поскольку они изначально задумывались как реверсируемые обратным вращением рабочего колеса, для них были измерены аэродинамические характеристики реверсивного режима работы.

Рассматриваемая схема ОВ-103 имеет рабочее колесо (РК) с 10-ю лопатками ( $z_K = 10$ ), которые могут иметь разный угол установки  $\theta_K$ . В справочной литературе приводятся характеристики реверсивного режима работы для углов установки (угол между плоскостью вращения вентилятора и касательной к нижней поверхности профиля)  $15^\circ$ ,  $25^\circ$  и  $35^\circ$ . Вентилятор может быть снабжён спрямляющим аппаратом (СА) с 14-ю лопатками ( $z_{СА} = 14$ ), которые в режиме реверса разворачиваются на такой угол  $\theta_{СА}$ , что СА начинает работать как направляющий аппарат (НА).

КПД вентилятора в реверсивном режиме работы низкий и не превышает 35%, однако при этом максимальный расход, который может дать вентилятор, при нулевом полном давлении, превышает таковой в прямом режиме. В первую очередь, как отмечается в [7], наибольшие потери и низкий КПД в реверсивном режиме связаны с работой профилей на больших углах атаки на входе в решётку, при этом направление поворота потока не совпадает с направлением изгиба средней линии профиля. В меньшей степени низкий КПД связан с наличием острой кромки профиля на входе потока, а также с работой лопаток РК и СА с непостоянной циркуляцией по радиусу.

В Ansys была составлена расчётная схема для плоской решётки, составленной из профилей на среднем радиусе РК ОВ-103 (рис. 3.а). Для того, чтобы оценить влияние острой кромки, направленной навстречу потоку, на качество расчёта, была также составлена расчётная модель с профилем, имеющим такой же угол установки, относительную толщину и прогиб средней линии, но инвертированным по длине средней линии, т.е. с гладкой кромкой на входе (рис. 3.б).

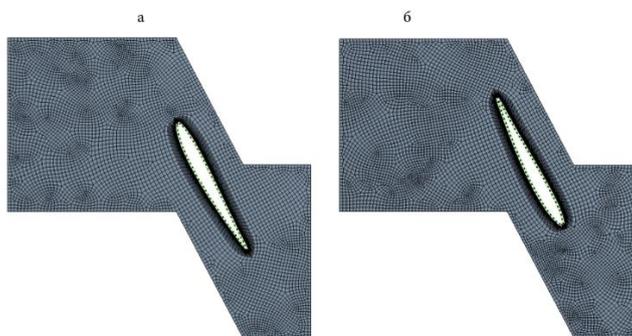


Рис. 2. Участок решётки с профилем лопатки К-103 на среднем радиусе:  
а – профиль с входом потока со стороны острой кромки (реверсивный режим);  
б – решётка с инвертированным профилем с входом потока со стороны гладкой кромки

## Результаты

В результате расчёта углов отклонения для решёток, составленных из профилей NASA, были получены значения углов поворота потока  $\Delta\beta$  в зависимости от угла атаки  $\alpha_1$ . На рис. 3 приведены сравнение графиков, полученных с использованием разных моделей турбулентности, с экспериментальным, для профиля NASA 65-010 нулевой кривизны с густотой  $\tau$ , равной 1.

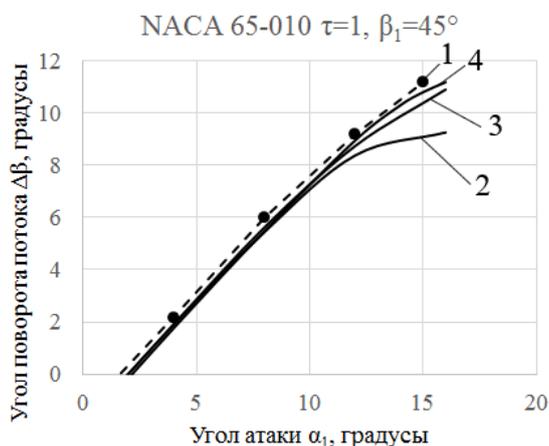


Рис. 3. Зависимость угла поворота потока от угла атаки в решётке профилей NASA65-010 с густотой  $\tau = 1$ , углом входа потока  $\beta_1 = 45^\circ$ :

1 – экспериментальные данные, 2 – модель Спаларта - Аллмареса, 3 – k-ε модель, 4 – SST-модель

Как видно из представленных графиков, наилучшее приближение к эксперименту обеспечивает SST-модель турбулентности. На линейном участке изменения угла поворота от угла атаки все модели показали приемлемый результат. По мере увеличения угла атаки и развития срыва в решётке лучший результат дала SST-модель турбулентности, однако и она в некоторых случаях недостаточно надёжно предсказывала угол отклонения. В последующих расчётах именно эта модель турбулентности применялась для вычисления параметров обтекания решёток ОВ-103.

Далее для параметров потока и характеристики вентилятора будут употребляться обозначения, принятые в [7]. В ходе расчёта реверсивных качеств решётки профилей ОВ-103 определялись углы выхода потока  $\beta_2$  и потери полного давления  $\zeta$  в решётке в зависимости от угла входа  $\beta_1$  (рис. 4). Расчёт показал, что при небольшом отрицательном угле поворота потока ( $\beta_2 - \beta_1$ ) потери полного давления минимальны и составляют менее 2% от давления на входе в решётку. При этом диффузорный режим обтекания ( $\beta_2 > \beta_1$ ) сопровождается большими, чем в конфузорном режиме, потерями давления.

Решётка с инвертированным профилем обтекает с меньшими потерями ( $\zeta_{\min} < 1,5\%$ ). При этом углы поворота потока в решётке из таких профилей меньше, чем в решётке с профилем, развернутым острой кромкой к потоку.

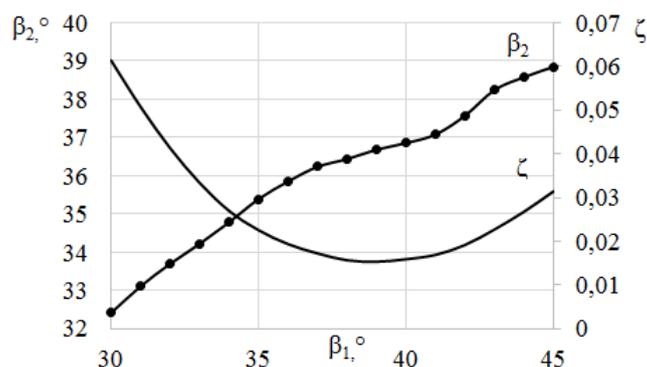


Рис. 4. Зависимости угла выхода потока  $\beta_2$  и коэффициента потерь полного давления  $\zeta$  для решётки из профилей ОВ-103 на среднем радиусе от угла входа потока  $\beta_1$

Полученные зависимости можно использовать для оценки давления, создаваемого вентилятором. Коэффициент теоретического давления  $\psi_T$  можно определить по известной формуле Эйлера [16]:

$$\psi_T = 2\bar{r} \varphi_a (\operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2)$$

Здесь  $\bar{r} = \sqrt{(1-v^2)}/2$  - относительный средний радиус вентилятора,  $v$  - втулочное отношение,  $\varphi_a$  - коэффициент среднерасходной скорости потока. При этом угол входа потока можно связать с  $\varphi_a$  как

$$\varphi_a = \bar{r} / (\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{ctg} \delta_1),$$

где  $\delta_1$  - угол выхода потока из СА, работающего в реверсивном режиме как НА.

Для того, чтобы найти зависимость коэффициента давления от коэффициента расхода  $\varphi$ , необходимо выразить последний через  $\varphi_a$ :

$$\varphi = \varphi_a (1 - v^2).$$

Учет потерь полного давления в решётке можно, умножив оставшуюся долю полного давления на коэффициент теоретического давления, определив, таким образом, коэффициент давления  $\psi$ :

$$\psi = (1 - \zeta) \psi_T.$$

С использованием приведённых формул были рассчитаны аэродинамические характеристики схемы ОВ-103 (рис.5, рис.6). Для схемы с СА угол выхода потока  $\delta_1$  из него на среднем радиусе был рассчитан по теоретическим зависимостям и составил  $114^\circ$ .

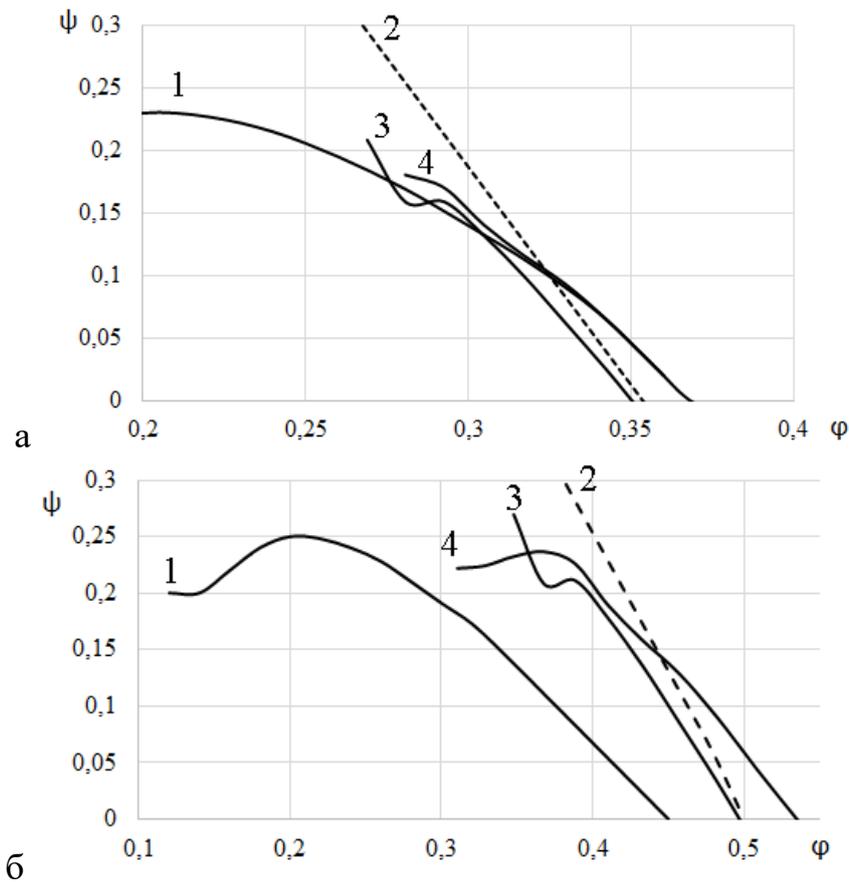


Рис. 5. Аэродинамические характеристики реверсивного режима схемы ОВ-103  
 а – без СА, б - с СА.  $\theta_K = 35^\circ$ ,  $\theta_{CA} = 100^\circ$ ,  $z_K = 10$ ;  $z_{CA} = 15$ . 1 – экспериментальная; 2 – теоретическая; 3 – рассчитанная по вычисленным углам отклонения в решётке с закруглённой кромкой на входе; 4 – рассчитанная по вычисленным углам отклонения в решётке с острой кромкой на входе

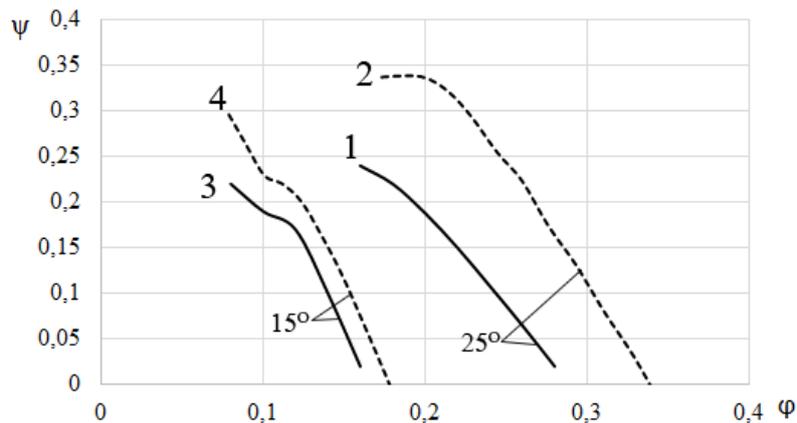


Рис. 6. Аэродинамические характеристики реверсивного режима схемы ОВ-103 с СА

1 – экспериментальная характеристика при угле установки лопаток РК  $25^\circ$ , 2 – расчётная характеристика при угле установки лопаток РК  $25^\circ$ , 3 – экспериментальная характеристика при угле установки лопаток РК  $15^\circ$ , 4 – расчётная характеристика при угле установки лопаток РК  $15^\circ$

## *Обсуждение*

Аэродинамическая характеристика, рассчитанная по вычисленным параметрам потока, обтекающего плоские решётки, составленные из профилей РК на среднем радиусе для схемы ОВ-103, которая состоит из одного колеса, для угла установки лопаток  $35^\circ$  (рис.5а, кривая 4) получилась достаточно близкой к экспериментальной (рис.5а, кривая 1). Величина максимального расхода совпала с высокой точностью (разница составила менее 5%). Однако при этом полученная характеристика не может быть использована для предсказания точки максимального давления вентилятора. На рис.5а показана также характеристика, рассчитанная по параметрам потока в решётке, составленной из инвертированных профилей (кривая 3). Максимальный расход по этой характеристике меньше, чем экспериментальный. При этом он близок к получаемому по теоретическим зависимостям угла поворота потока в решётке (кривая 2).

Для схемы с СА полученные характеристики обладают большим максимальным расходом, чем экспериментальный. Это можно объяснить тем, что потери давления в потоке на радиусах, отличных от среднего, велики из-за увеличенных спрямляющим аппаратом углов атаки, при этом они не учитываются при расчёте по параметрам на среднем радиусе.

## *Заключение*

По результатам расчёта в программе ANSYS углов отклонения потока в плоской решётке, составленной из профилей NACA 65, и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, показано, что наилучшим из рассмотренных является расчёт с применением SST модели турбулентности Ментера с 4-мя уравнениями.

В программе ANSYS Fluent вычислены углы отклонения и потери полного давления в плоской решётке, составленной из профилей лопаток рабочего колеса вентилятора ОВ-103 на среднем радиусе. По этим данным построены аэродинамические характеристики реверсивного режима. В случае вентилятора, не имеющего СА, максимально развиваемый расход на такой характеристике получился таким же (разница составила менее 5%), как и экспериментально измеренный. Для схемы с СА получаемый таким образом расход имеет большую величину, чем экспериментальный.

## *Благодарности*

Работа выполнена в рамках научной темы FWNZ-2021-0004.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Правила безопасности в угольных шахтах: ПБ 05-618-03. – М.: Недра, 2004. – 296 с.
2. Benišek, M.H.; Čantrak, Đ.S.; Ilić, D.B.; Janković, N.Z. New Design of the Reversible Jet Fan. Processes 2020, 8, 1671. <https://doi.org/10.3390/pr8121671>
3. Московко Ю.Г. Методика проектирования и разработка энергоэффективных осевых вентиляторов с профилями лопаток специальной формы: Диссертация кандидата технических 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. A. Benazza, E. Blanco, M. Abidat. 2D Detached-Eddy Simulation Around Elliptic Airfoil at High Reynolds Number. Journal of Applied Sciences. 7. 10.3923/jas.2007.547.552.
6. Ивановский И.Г. Шахтные вентиляторы: Учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. – 196 с.
7. Брусиловский И.В., Аэродинамический расчет осевых вентиляторов. – М.: Машиностроение, 1986. – 288 с.
8. 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
9. Ушаков К.А., Брусиловский И.В, Бушель А.Р. Аэродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкций. М: Госгортехиздат, 1960. – 422 с.
10. Терещенко Ю.М., Дорошенко Е.В., Дж. Аболлахсан заде Моделирование течения в компрессорных решетках при больших углах атаки // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. - №4/8 (76) – с. 26-30
11. J. Joo, G. Medic, Om. P. Sharma Large-Eddy Simulation of Roughened NACA65 Compressor Cascade // Conference: ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition - June 2017. DOI:10.1115/GT2017-64889
12. Emery I.C. et al, Systematic Two-Dimensional Cascade Tests of NACA 65-Series Compressor Blades at Low Speeds. NACA Report 1368, 1958 – p.85
13. 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.
14. Гарбарук А. В. Современные подходы к моделированию турбулентности : учеб. пособие. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 234 с.
15. Брусиловский И.В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. М.: Недра, 1978 – 198 с.
16. Брусиловский И.В. Аэродинамика осевых вентиляторов. М.: Машиностроение, 1984 – 240 с.

© П. В. Косых, 2021