

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.05

УДК 622.44

**В.Н. Макаров¹, Р.И. Хайрулин², Н.В. Макаров¹,
Р.Г. Ахметов³, Н.Н. Таланкин¹**

¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург,
Российская Федерация

²Фонд жилищного развития «Уралтрансгаз-Жилстрой», Екатеринбург,
Российская Федерация

³АО «Костанайские минералы», Житикара, Республика Казахстан

ДОМИНАНТА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

В основу природоподобной соразмерности в статье положена научная гипотеза о доминанте отношения циркуляции скорости и ускорения потока, обтекающего профиль лопатки рабочего колеса вентилятора, как аэродинамической аналогии механизма преобразования энергии вращающегося рабочего потока вентилятора и «машущего крыла» птиц. **Цель исследования:** разработка методологии проектирования аэродинамически адаптивных вентиляторов с доминантой природоподобия для аппаратов воздушного охлаждения в целях повышения конкурентоспособности предприятий нефтегазовой отрасли РФ. **Методы:** новизна исследований позволила на базе вышеуказанной гипотезы с использованием теорем Гельмгольца, Коши, Кельвина, гидродинамической аналогии геометрической и кинематической диффузорности, модифицирования формулы Жуковского-Чаплыгина-Кутта применительно к профилям с источниками на их поверхности получить математическую модель расчета дополнительной циркуляции и коэффициента природоподобной соразмерности от параметров источника. Созданные на основе принципа природоподобной соразмерности вентиляторы характеризуются тем, что адекватно и одновременно с минимальными энергетическими затратами создают необходимые параметры охлаждающего воздуха в теплообменных аппаратах, реализуют концепцию оптимальной экотехнологии недропользования. **Результаты:** экспериментально показано, что коэффициент природной соразмерности является аналогом интегрального аэродинамического качества профиля лопатки рабочего колеса вентилятора. Использование разработанной математической модели позволило спроектировать профиль с распределенными источниками, имеющий в диапазоне рабочих режимов угла атаки от 0° до 20°, на 45 % большее значение коэффициента природоподобной соразмерности и соответственно интегрального коэффициента аэродинамического качества.

Ключевые слова: природоподобная соразмерность, профиль, решетка, вентилятор, энергоэффективность, струйное управление течением, циркуляция, источник, адаптивность, доминанта.

V.N. Makarov¹, R.I. Khairulin², N.V. Makarov¹,
R.G. Akhmetov³, N.N. Talankin⁴

¹Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation

²Housing Development Uraltransgaz-Zhilstroy, Yekaterinburg, Russian Federation

³АО "Kostanay minerals", Zhitikara, Republic of Kazakhstan

THE DOMINANT OF INCREASING THE EFFICIENCY OF AIR-COOLING DEVICES FOR THE OIL AND GAS COMPLEX

The basis of the nature-like proportionality in the article is based on the scientific hypothesis about the dominant ratio of the velocity circulation and acceleration of the flow flowing around the profile of the fan impeller blade, as an aerodynamic analogy of the energy conversion mechanism of the rotating fan working flow and the "waving wing" of birds. **The purpose of the study:** to develop a methodology for designing aerodynamically adaptive fans with a dominant natural similarity for air cooling devices in order to increase the competitiveness of enterprises in the oil and gas industry of the Russian Federation. **Methods:** the novelty of the research made it possible, on the basis of the above hypothesis using Helmholtz, Cauchy, Kelvin theorems, hydrodynamic analogy of geometric and kinematic diffusivity, modification of the Zhukovsky-Chaplygin-Kutta formula in relation to profiles with sources on their surface, to obtain a mathematical model for calculating additional circulation and the coefficient of nature-like proportionality from the source parameters. Fans created on the basis of the principle of nature-like proportionality are characterized by the fact that they adequately and simultaneously with minimal energy costs create the necessary parameters of cooling air in heat exchangers, implement the concept of optimal ecological technology of subsurface use. **Results:** it has been experimentally shown that the coefficient of natural proportionality is an analogue of the integral aerodynamic quality of the fan impeller blade profile. The use of the developed mathematical model made it possible to design a profile with distributed sources that has a 45% higher value of the coefficient of nature-like proportionality and, accordingly, the integral coefficient of aerodynamic quality in the range of operating modes of the angle of attack from 0° to 20°.

Keywords: nature-like proportionality, profile, grid, fan, energy efficiency, jet flow control, circulation, source, adaptability, dominant.

Введение

Актуальность разработки адаптивных вентиляторов для аппаратов воздушного охлаждения (АВО) обусловлена тем, что низкая энергоэффективность аэротермодинамических процессов на предприятия нефтегазового комплекса РФ эквивалентна 8 % ВВП страны [1–4]. Значительные колебания параметров технологической среды ухудшают энергоэффективность, и в первую очередь это обусловлено их низкой адаптивностью [5–8].

В основу реализации природоподобной соразмерности применительно к вентиляторам положена задача установления доминанты механизма энергоэффективного взаимодействия решетки лопаток рабочего колеса вентилятора и воздушного потока, управление которой способно адекватно с минимальными потерями энергии реагировать на

внешние факторы, определяемые технологическими процессами производства [9–12].

В данной статье предложена методология создания энергоэффективных профилей лопаток рабочего колеса турбомашин с использованием коэффициента природоподобной соразмерности, определяющего в качестве доминанты управления природоподобием процесса преобразование механической энергии турбомашин во внутреннюю энергию воздушного потока, соотношение между циркуляцией скорости и ускорения потока вокруг профилей решетки лопаток ее рабочего колеса [13–16].

Взаимодействие потока воздуха с лопатками рабочего колеса вентилятора осуществляется через устойчивую вихревую дорожку, формируемую системой присоединенных вихрей, являющуюся гидродинамическим аналогом профиля лопаток [17–20].

При изменении аэродинамических параметров технологической среды, на которые рассчитан вентилятор, происходит деформация вихревой системы, являющейся гидродинамическим аналогом циркуляции скорости, то есть распределения давления согласно теореме Остроградского–Гаусса включительно до ее разрыва, и как результат снижение интенсивности присоединенных вихрей [21, 23]. Одновременно со снижением циркуляции происходит рост потерь давления на отрывное вихреобразование, обусловленное возникновением локальной диффузорности, снижением скоростей, то есть резким возрастанием отрицательной циркуляции ускорения потока, и как результат формирование вихревой дорожки Кармана [24, 25].

Обусловленное градиентом давления локальное изменение скорости более допустимой величины, то есть отрицательная циркуляция ускорения приводит к торможению потока до скорости, равной 0, то есть смещению точки полного торможения потока, соответствующей точке схода потока с профиля – задней критической точке (ЗКТ) по отношению к задней кромке профиля.

Таким образом, циркуляция ускорения на профиле лопатки рабочего колеса вентилятора даже в условиях потенциального течения может вызывать отрыв потока, на что доминирующее влияние оказывает локальная диффузорность, которая для классических профилей при нулевом угле атаки может быть представлена в виде:

$$D_{\kappa}^{\text{л}} = 1 - \frac{\partial \bar{y}(\bar{x})}{\partial \bar{x}} = 1 + \frac{\partial \bar{V}(\bar{x})}{\partial \bar{x}}, \quad (1)$$

где \bar{y}, \bar{x} – относительные координаты точек профиля лопатки в решетке рабочего колеса вентилятора; $\bar{x} = \frac{x}{b}$; $\bar{y} = \frac{y}{b}$; b – хорда лопатки, м; $\bar{V}(\bar{x})$ – относительная скорость потока воздуха на профиле лопатки; $\bar{V} = \frac{V}{u}$; u – окружная скорость лопатки, м/с.

Учет вышеизложенного принципиально важен для достижения максимальной энергоэффективности вентиляторов на номинальном режиме их работы. Однако учитывая высокие требования к адаптивности вентиляторов для нефтегазового комплекса РФ, это еще более важно в силу широкого изменения режимов их работы, обусловленных изменением параметров технологических процессов [27, 28].

Обладая высокой экономичностью на номинальном режиме, вентиляторы резко снижают экономическую эффективность при изменении внешних условий в связи с изменением кинематических параметров потока, обтекающего профиль лопаток рабочего колеса.

Для классических профилей лопаток рабочих колес турбомашин существует внутреннее противоречие между необходимостью увеличения положительного градиента скорости для роста циркуляции, определяющей давление, то есть уровень энергетического взаимодействия до точки максимальной скорости и обеспечение максимально допустимого отрицательного градиента скорости, отражающего гидродинамическую аналогию с локальной диффузорностью, при котором в условиях потенциального течения возникает отрывное вихреобразование и смещение ЗКТ профиля по отношению к задней кромке профиля [23, 29].

Для разработки методологии создания профилей лопаток рабочего колеса турбомашин, обеспечивающих максимально возможную энергоэффективность для заданного поля аэродинамических параметров, предложена научная гипотеза, в основу которой положен принцип природоподобной соразмерности. Научная и научно-практическая новизна данной работы заключается в теоретическом и экспериментальном доказательстве предложенной гипотезы, на базе которой построен математический аппарат, связывающий геометрические параметры профилей лопаток и аэродинамические параметры потока с критерием, определяющим эффективность преобразования энергии вращающегося рабочего колеса во внутреннюю энергию потока. В аэродинамике профилей лопаток рабочего колеса вентилятора доминанта управления отношением циркуляции скорости потока к циркуляции его ускорения на профиле

лопаток, т.е. локальной диффузорностью, определяет эффективность преобразования механической энергии вращающегося рабочего колеса во внутреннюю энергию потока. Предложенная гипотеза позволяет с использованием полученной математической модели проектировать форму профиля лопатки, расход и расположение источников, при которых достигается максимальная эффективность преобразования механической энергии во внутреннюю энергию потока. Оригинальность статьи заключается в одновременном учете в каждой точке профиля возможности максимального прироста циркуляции потока при минимальной диффузорности, то есть минимальной потери энергии.

1. Объект и методы исследования

Давление, развиваемое вентилятором в результате энергетического взаимодействия потока и лопаток рабочего колеса, обусловлено циркуляционным обтеканием, т.е. формированием устойчивой вихревой дорожки присоединенных вихрей. Циркуляция потока вокруг профиля лопаток возникает вследствие изменения величины и направления вектора скорости при обтекании его контура [22, 23, 30].

С учётом уравнения неразрывности поток, обтекающий рабочую и тыльную поверхности контура, можно ускорять либо замедлять не только за счет изменения длины рабочей и тыльной поверхностей контура от передней критической точки (ПКТ) до ЗКТ, но и с помощью источников либо стоков на поверхности лопатки, точнее, на поверхности профиля лопатки единичной длины для расчета удельных энергетических характеристик источников либо стоков.

Раздельное управление циркуляцией скорости и циркуляцией ускорения потока вокруг профиля лопатки возможно за счет локального распределения источников, стоков на нём с интенсивностью $q(\bar{x})$. В этом случае формула (1) для расчета локальной диффузорности примет вид:

$$D_n^l = 1 - \frac{\partial(\bar{v}-q(\bar{x}))}{\partial\bar{x}} = 1 + \frac{\partial y(x)}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial q(\bar{x})}{\partial\bar{x}} - \operatorname{tg}\gamma, \quad (2)$$

где $q(\bar{x}) = \frac{q(\bar{x})}{Q}$ – относительный расход источника на поверхности профиля лопатки; $q(\bar{x})$ – интенсивность источника, м³/с; Q – производительность вентилятора, м³/с.

Таким образом, источник устраняет жесткую корреляцию геометрических параметров профиля лопатки рабочего колеса вентилятора и кинематических параметров, обтекающего их потока воздуха.

Следовательно, возможно изменение циркуляции скорости и ускорения потока в широком диапазоне при сохранении допустимой величины кинематической диффузорности, фактически устраняя формирование отрывного течения потока, т.е. вихревой дорожки Кармана как основной причины снижения энергетической эффективности взаимодействия лопаток рабочего колеса и потока воздуха [23, 31].

Следовательно, с помощью источников, не изменяя геометрические параметры профиля лопатки, угол атаки набегающего потока, можно формировать вокруг него необходимую вихревую дорожку устойчивых присоединенных вихрей под заданные, соответствующие технологическим требованиям энергетические параметры расхода и давления воздуха.

Силовое взаимодействие лопаток рабочего колеса и потока воздуха в этом случае происходит через адаптивную аэродинамическую систему вихрей, обеспечивающих эффективность вентиляторов и их восприимчивость к изменениям внешней среды. Подобно тому, как крыло птицы, изменяя свою форму при взаимодействии с потоком воздуха обеспечивает эффективное безотрывное обтекание, система присоединенных вихрей, создаваемых источниками на профиле лопаток рабочего колеса вентилятора, являясь посредником во взаимодействии потока воздуха межлопаточного канала с лопатками, обеспечивает их безотрывное обтекание.

Локальный коэффициент природоподобной соразмерности аэродинамических процессов взаимодействия профиля лопатки рабочего колеса с источником на его поверхности и потока воздуха в конкретной координате профиля (x_a, y_a) с учётом теоремы Кельвина и принципа суперпозиции выразим в виде:

$$k_{\Pi}^{\lambda}(a) = k_{\Pi}^k(a) + \Delta k_{\Pi}^q(a) = 1 - \frac{|\gamma_{a(a)}|}{\gamma_{(a)}} = 1 - \frac{D_{\Pi}^{\Pi}(a)}{(\bar{V}(a) + \bar{q}(a)^2)}, \quad (3)$$

где $k_{\Pi}^k(a)$ – локальный коэффициент природоподобия классического профиля; $k_{\Pi}^q(a)$ – локальный коэффициент природоподобия от действия источника в точке $x_a y_a$ на поверхности профиля, дополнительная сингулярная составляющая локального коэффициента природоподобий; $\gamma_{(a)}, \gamma_{a(a)}$ – коэффициент циркуляции скорости и ускорения потока в окрестности точки $x_a y_a$, на длине профиля $\Delta x = 1$; $\bar{q}(a)$ – коэффициент интенсивности источника в $x_a y_a$ на профиле; $D_{\Pi}^{\Pi}(a)$ – локаль-

ная диффузорность потока в точке $x_a y_a$ на профиле; $\bar{V}(a)$ – коэффициент скорости потока в точке x_a, y_a на профиле.

Исследование влияния коэффициента природоподобной соразмерности актуально исключительно в области диффузорного течения потока. Учитывая, что локальная скорость и циркуляция потока на профиле унимодальные, формулу (3) необходимо рассматривать на участке профиля за точкой с координатой x_m, y_m , в которой они принимают максимальное значение. Таким образом, эта область течения потока от $x = x_m$, до $x = x_{\text{ЗКТ}}$ характеризуется тем, что в ней вторая производная комплексного потенциала имеет отрицательное значение.

Таким образом, коэффициент природоподобной соразмерности для профиля на режиме $\theta = \theta_\infty$ определяют по формуле:

$$K_n(\theta_\infty) = \int_{x_m}^{x_{\text{ЗКТ}}} 1 - \frac{|\gamma_a(x)|}{\gamma(x)} dx. \quad (4)$$

Коэффициент природоподобной соразмерности в заданном диапазоне рабочих режимов профиля лопатки рабочего колеса определяется по формуле:

$$K_n(\Delta\theta_\infty) = 1 - \int_{\Delta\theta_\infty} \int_{x_m}^{x_{\text{ЗКТ}}} \frac{|\gamma_a(x)|}{\gamma(x)} dx d\theta_\infty, \quad (5)$$

где $\Delta\theta_\infty$ – диапазон рабочих режимов профиля; $x_{\text{ЗКТ}}$ – координаты ЗКТ профиля; $\bar{V}(x)$ зависит от геометрических параметров профиля лопатки и θ_∞ . Интенсивность и место расположения на профиле лопатки источника $\bar{q}(x)$ позволяют управлять скоростью и циркуляцией, т.е. влиять на локальную диффузорность и коэффициент природоподобия.

Таким образом, с помощью изменения интенсивности и положения источников на поверхности профиля лопатки рабочего колеса можно минимизировать потери энергии на отрывное вихреобразование, увеличивая при этом циркуляцию потока, т.е. коэффициент природоподобия.

$$D_{\text{п}}^{\text{п}}(x) = F\left(\gamma(x), \frac{\partial \bar{q}(x)}{\partial x}\right), \quad (6)$$

где $\gamma(x) = (\bar{V}_x + q(x)) \partial x$ – коэффициент циркуляции потока в интервале $[x_a - (x_a + \partial x)]$ на профиле лопатки.

Таким образом, для повышения коэффициента природоподобия необходимо выполнить условие, при котором:

$$\frac{D_{\text{к}}^{\text{п}} + \Delta D_{\text{к}}^{\text{п}}}{(\bar{V}(x) + q(x))^2} \rightarrow \min, \text{ при } D_{\text{к}}^{\text{п}} \geq 0, \quad (7)$$

где $\Delta D_q^{\text{л}} = \frac{\partial \bar{q}(x)}{\partial \bar{x}}$ – дополнительная кинематическая конфузурность (снижение диффузорности) потока от источника с интенсивностью $q(x)$ в точке x_a, y_a .

В статье предложены теоретические исследования аэродинамики решетки лопаток рабочего колеса вентилятора с расположенными на профилях источниками либо стоками для подачи воздуха через аэродинамические каналы, расположенные на спинке профиля из полости лопатки.

Для построения математической модели реализации принципа природоподобной соразмерности в аэродинамике взаимодействия потока воздуха с профилями лопаток рабочего колеса, на которых расположены источники, воспользуемся модификацией метода конформного отображения [17–20, 23, 32–34].

Предварительно преобразуем обтекание классического профиля на физической плоскости в обтекание на вспомогательной римановой плоскости. Математическую модель сформируем на вспомогательной плоскости комплексного переменного $(\varphi + i\psi) = \lambda$ обтекания потоком цилиндра единичной длины (круга) с радиусом r , равным a (рис. 1, б). При этом исходим из того, что геометрическая задача конформного отображения внешней по отношению к профилям лопаток рабочего колеса области в физической плоскости обтекания рабочего колеса на внешнюю по отношению к цилиндру область вспомогательной римановой плоскости, в том числе и с учётом источника на поверхности цилиндра, имеет единственное решение.

Набегающий поток зададим комплексным вектором скорости V_{∞} , образующим с осью $O_z x$, угол θ_{∞} . Физическая плоскость течения D_z имеет вырез в форме профиля лопатки по контуру K , что делает её двухсвязной. Для определенности задачи установим величину циркуляции скорости $\gamma(x)$ по произвольному, охватывающему профиль лопатки контуру K_z .

Для классического обтекания цилиндра потоком воздуха в римановой вспомогательной плоскости D_{λ} циркуляция в соответствии с интегралом Коши может быть выражена формулой:

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\Pi(\lambda)}{d\lambda} d\lambda = |V_{\infty}| e^{-\theta_{\infty} i} \cdot \pi i, \quad (8)$$

где $\lambda_{ЗКТ} = a e^{i\theta_{ЗКТ}} \cdot V_{\infty} = |V_{\infty}| e^{i\theta_{ЗКТ}}$; $\theta_{ЗКТ}$ – полярный угол точки $\lambda_{ЗКТ}$ на окружности круга $r = a$; $\theta_{ЗКТ}$ – угол, образованный скоростью на бесконечности с осями $O_z x$ или $O_{\lambda} \psi$.

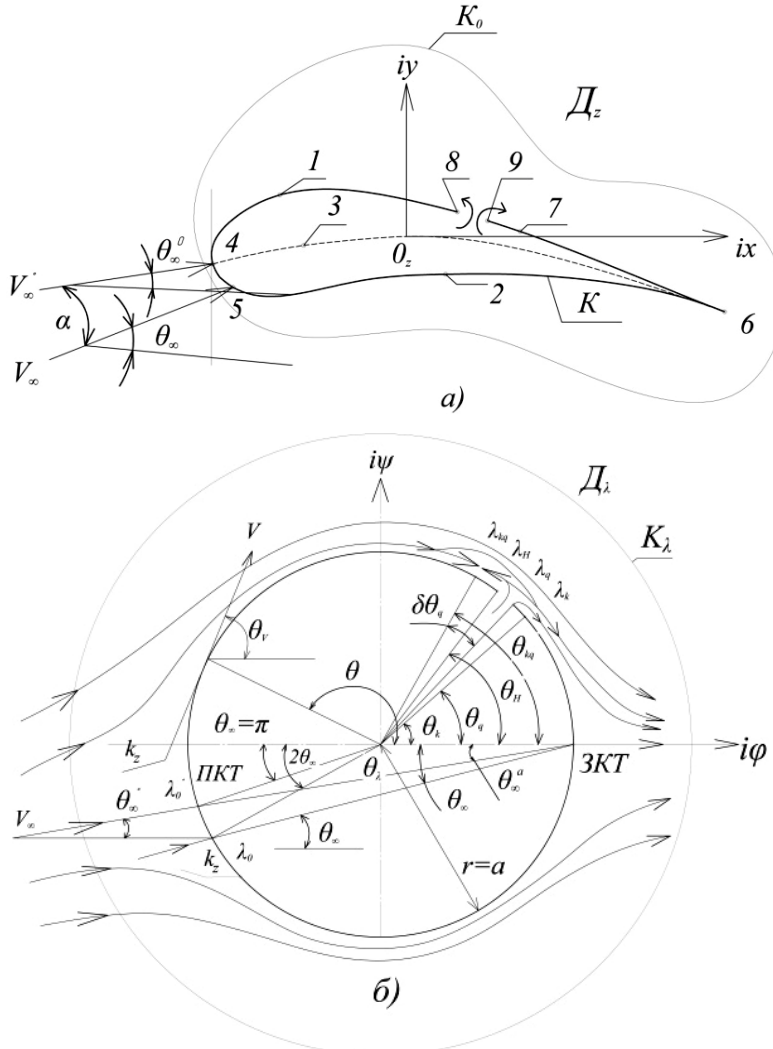


Рис. 1. Аэродинамический профиль лопатки рабочего колеса вентилятора с источником на рабочей поверхности (а) и его конформное отображение на цилиндр радиус r в римановой плоскости D_{λ} (б): 1 – рабочая поверхность; 2 – тыльная поверхность; 3 – средняя линия профиля; 4, 5 – ПКТ при V_{∞}^0 и V_{∞} ЗКТ; 6 – ЗКТ; 7 – точка обрыва потока; 8, 9 – границы источника (аэродинамического канала); 10 – линия безциркуляционного обтекания профиля; D_z – физическая плоскость обтекания профиля риманова плоскость обтекания цилиндра; K_z, K_{λ} – замкнутые контуры, охватывающие контур K и цилиндр в областях D_z и D_{λ}

Циркуляцию потока при обтекании цилиндра в римановой плоскости D_λ в соответствии с постулатом Жуковского–Чаплыгина–Кутта после соответствующих преобразований в тригонометрической форме получим в виде [23, 36–37]:

$$\gamma = -4\pi a m_\infty |V_\infty| \sin \theta_\infty = -4\pi a m_\infty |V_\infty| \sin(\alpha + \theta_\infty^\circ), \quad (9)$$

где α – угол атаки набегающего потока по отношению к средней линии профиля в ПКТ, $\alpha = \theta_\infty - \theta_\infty^0$; θ_∞^0 – угол бесциркуляционного обтекания профиля в физической плоскости течения D_z .

Скорость в любой точке θ цилиндра в тригонометрической форме примет вид:

$$\bar{V}_\theta = 4\bar{V}_\infty \sin(\theta - 2\theta_\infty) \sin \theta. \quad (10)$$

В соответствии с уравнением (13) модуль скорости набегающего потока в текущей координате θ при обтекании круга радиуса $r = a$ во вспомогательной плоскости D_λ определяется по формуле [23, 36, 37]:

$$|V_\theta| = 4V_\infty \sin(\theta + 2\theta_\infty) \cdot \sqrt{\sin \frac{\theta}{2}}. \quad (11)$$

Угол между вектором скорости набегающего потока и осью $O_\lambda \rho$ во вспомогательной плоскости D_λ в точке с координатой θ на цилиндре определяется по формуле (рис. 1, б):

$$\theta_V = \theta + 2\theta_\infty + \pi, \quad (12)$$

Из анализа (9)–(12) видно, что для классического профиля коэффициент природоподобной соразмерности K_n в формуле (3), зависящий от локальной диффузорности $D_k^{\text{пл}}$ (1) и скорости на профиле ($\bar{V}(x)$), определяется при заданном угле атаки α формой профиля лопатки, кривизной его средней линии, т.е. видом функции конформного отображения $z = f(\lambda)$.

С увеличением угла атаки α увеличивается по модулю отрицательное значение ускорения потока, обтекающего профиль, т.е. второй производной $\frac{\partial \bar{V}(\theta)}{\partial \theta}$ на участке $\theta \leq \theta_m$ во вспомогательной плоскости D_λ .

Рост диффузорности потока при $\theta \leq \theta_m$ может быть снижен для классических профилей только за счёт изменения геометрии профиля, что с учётом схода потока с ЗКТ возможно только за счёт уменьшения длины профиля лопатки в диапазоне $(\theta_{\text{ПКТ}} - \theta_m)$ путем смещения точки максимальной скорости потока в направлении к ПКТ.

2. Результаты исследования

Исследование заключается в установлении изменений обтекания круга радиусом $r = a$ на вспомогательной римановой плоскости D_λ за счет воздействия на него источников либо стоков, расположенных на окружности, для чего необходимо определить комплексный потенциал течения, учитывающий наличие источника, формирующего дополнительную систему присоединенных вихрей через аэродинамический канал на поверхности профиля лопатки. Данная функция должна характеризовать наличие источника в соответствующей точке круга радиуса r в плоскости λ , однозначно определяемой положением аэродинамического канала на профиле, но и в то же время соответствовать течению, линии тока которого представляют собой окружности радиусом r . Таким требованиям удовлетворяет система особенностей, образованная источником с интенсивностью $q(a)$, расположенным в точке окружности, соответствующей отображению аэродинамического канала контура K физической области течения плоскости D_z , источником $q(o)$ в точке $z = 0$ и стока $-q(\infty)$ в точке $z = \infty$ [23, 28].

Таким образом, в начале координат принципиальной схемы обтекания круга помещен источник, а в бесконечности – сток (рис. 1, б). Точки λ_H и λ_K фиксируют начало и конец аэродинамического канала. Точки $\lambda_{ПКТ}$, $\lambda_{ЗКТ}$ и λ_{Kq} – критические точки, т.е. сингулярную особенность, в которой скорость равна нулю.

Располагая круг $r = a = 1$ так, как указано на рис. 1, б, с учётом теоремы Коши и принципа суперпозиции дополнительную составляющую комплексному потенциалу согласно формуле (7), обусловленному влиянием источника с интенсивностью q , расположенному на окружности в точке λ_q , получим в виде:

$$\Delta\Pi_q(\lambda) = \frac{q}{2\pi} [\ln_H(\lambda - \lambda_H) + \ln_H(\lambda - \lambda_K)]. \quad (13)$$

Уравнение для расчета комплексной скорости в любой точке цилиндра на римановой плоскости D_λ с учетом (13) получим в виде:

$$\frac{d\Pi_g(\lambda)}{d\lambda} = -4V_\infty \bar{e}^{-\left(\theta_\infty - \frac{\theta_0}{2} - \frac{\theta_{Kq}}{2} + \frac{\theta_H + \theta_K + \theta}{4}\right)i} \cdot \frac{\frac{\sin \theta - \theta_0}{2} \frac{\sin \theta - \theta_{Kq}}{2} \frac{\sin \theta}{2}}{\sqrt{\frac{\sin \theta - \theta_H}{2} \frac{\sin \theta - \theta_K}{2}}}, \quad (14)$$

где $\Delta\Pi_g(\lambda) = \Pi(\lambda) + \Delta\Pi_q(\lambda)$; θ_∞ – угол вектора скорости на бесконечности в областях D_z и D_λ с осями O_zx и $O_\lambda\varphi$; θ_0 – полярный угол поло-

жения ПКТ на цилиндре в римановой плоскости $D_\lambda(\theta_{\text{ПКТ}})$, с учетом смещения от действия источника q ; $\theta_0 = \pi + 2\theta_\infty + \theta_g - \theta_{kq}$; θ_{kq} – полярный угол положения точки полного торможения потока на цилиндре от действия источника q (λ_{kq}) в римановой плоскости D_λ ; θ_H, θ_K – полярные углы положения точек начала λ_H и конца λ_K источника q на римановой плоскости D_λ ; θ – текущий угол положения точек $\lambda_\theta = re^{i\theta}$ на цилиндре в римановой плоскости D_λ .

Показатель степенной функции в уравнении (14) определяет угол вектора скорости потока вокруг цилиндра в римановой плоскости D_λ по отношению к оси O_zx , а модуль соответствует абсолютной величине скорости. Учитывая, что течение безотрывное с учётом вышеуказанного (см. рис. 1), получим величину условного смещения ПКТ θ_0 от действия источника интенсивностью q на поверхности круга в римановой плоскости D_λ в виде:

$$\delta\theta_q = \theta_0 - \pi - 2\theta_\infty = \theta_q - \theta_{kq}. \quad (15)$$

Следовательно, условное смещение ПКТ, определяющее кинематические параметры потока, обтекающего круг, а значит, и силовое взаимодействие, циркуляцию потока, диффузорность, находится в прямой зависимости от положения средней части выходного канала λ_q и его интенсивности q , влияющей на положение критической точки λ_K .

Принципиальная особенность изменения циркуляции вокруг цилиндра с источником на его поверхности в плоскости D_λ заключается в том, что увеличение циркуляции с ростом интенсивности источника q обусловлено увеличением объема воздуха, обтекающего поверхность цилиндра, где расположен источник. Рост объема воздуха, протекающего по поверхности цилиндра от ПКТ (λ_{q0}) до ЗКТ ($\lambda_{\text{ЗКТ}}$), приводит к увеличению его скорости в ЗКТ для обеспечения в ней условия Жуковского–Чаплыгина–Кутта.

Таким образом, от действия источника на поверхности цилиндра увеличение циркуляции потока не увеличивает его локальную диффузорность за точкой максимальной скорости: $\lambda_{V_{\text{max}}}$ при условии, если интенсивность источника $q(x) = |V(x)|$ равна уменьшению скорости потока, обусловленному только геометрией профиля, т.е. диффузорность классического профиля D_K^λ согласно (1). В этом случае выполняется условие:

$$\frac{\partial V(\lambda)}{\partial \lambda} = \frac{d^2 \Pi(\lambda)}{d^2 \lambda} = 0. \quad (16)$$

Для определения циркуляции вокруг цилиндра с источником на его поверхности γ_q в римановой плоскости D_λ и соответствующего её интенсивности источника q при заданном комплексном потенциале потока $\Pi q(\lambda)$ воспользуемся интегралом Коши по замкнутому контуру вокруг цилиндра с учётом теоремы Кельвина о постоянстве циркуляции по замкнутому контуру, в том числе и $r \rightarrow \infty$:

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\Pi q(\lambda)}{d\lambda} d\lambda = V_\infty e^{(\theta_\infty - \theta_\infty)i} (e^{\theta_{\text{H}}i} + e^{\theta_{\text{K}}i} - 2e^{\theta_0i} + 2e^{\theta_{\text{Kq}}i}) \pi i. \quad (17)$$

Сравнивая формулы (8), (17), можно обнаружить принципиальное отличие циркуляции потока воздуха по контуру классического профиля и профиля с источником.

Таким образом, с учетом теоремы Кельвина формулы для расчёта циркуляции вокруг цилиндра радиусом $r = 1$ интенсивности источника, т.е. секундного расхода воздуха q через аэродинамический канал $\lambda_{\text{H}}\lambda_{\text{K}}$ на римановой плоскости D_λ , получим в виде:

$$\gamma_q = \pi V_\infty r [2 \sin(\theta_\infty - \theta_0) + 2 \sin(\theta_\infty - \theta_{\text{Kq}}) - \sin(\theta_\infty - \theta_{\text{H}}) - \sin(\theta_\infty - \theta_{\text{K}}) + 2 \sin \theta_\infty]; \quad (18)$$

$$q = \pi V_\infty r \left[\begin{array}{c} -2 \cos(\theta_\infty - \theta_0) \\ +2 \cos(\theta_\infty - \theta_{\text{Kq}}) - \cos(\theta_\infty - \theta_{\text{H}}) - \cos(\theta_\infty - \theta_{\text{K}}) + 2 \cos \theta_\infty \end{array} \right].$$

Таким образом, прирост циркуляции скорости и циркуляции ускорения потока при обтекании цилиндра с источником на его поверхности по сравнению с классическим обтеканием и необходимая для этого интенсивность источника определяются по формулам:

$$\Delta \gamma_q^n = \pi V_\infty r [-2 \sin(\theta_\infty - \theta_{\text{Kq}}) + \sin(\theta_\infty - \theta_{\text{H}}) + \sin(\theta_\infty - \theta_{\text{K}})];$$

$$\Delta \gamma_{q_a}^n(\lambda_q) = 2\pi V_\infty r [\cos(\theta_\infty - \theta_q) - \cos(\theta_\infty - \theta_{\text{Kq}})]; \quad (19)$$

$$q^n = \pi V_\infty r [2 \cos(\theta_\infty - \theta_{\text{Kq}}) - \cos(\theta_\infty - \theta_{\text{H}}) - \cos(\theta_\infty - \theta_{\text{K}})].$$

После преобразования прирост локального коэффициента природоподобия от действия источника с учетом формулы (3) получим в виде:

$$\Delta K_n^q(\theta_\infty) = \frac{\cos(\theta_\infty - \theta_{\text{Kq}}) - \cos(\theta_\infty - \theta_q)}{\sin(\theta_\infty - \theta_{\text{Kq}}) - \sin(\theta_\infty - \theta_q)}. \quad (20)$$

С увеличением θ_q и θ_{kq} коэффициент природоподобия K_n^q возрастает за счёт снижения скорости торможения потока на цилиндре от действия источника на его поверхности в римановой плоскости D_λ .

Распределение источников на поверхности цилиндра римановой плоскости D_λ от $\theta = 0$ до $\theta_{V\max}$, соответствующей максимальной скорости потока позволяет обеспечить максимальный прирост циркуляции при минимальной локальной и общей диффузорности.

Для классического обтекания цилиндра при $\theta_\infty = \text{const}$ изменения циркуляции скорости и ускорения физически невозможны. Они изменяются только при изменении θ_∞ , т.е. угла натекания потока [16, 38]. Учитывая, что $\theta_0 = \pi + 2\theta_\infty$ при классическом обтекании с учетом (12), (20) получим аналитическое выражение коэффициента природоподобной соразмерности для классического профиля в римановой плоскости D_λ в виде:

$$K_n^k(\theta_0) = 1 - \left| \frac{\sin \theta_0}{\cos \left(\frac{\theta_0}{2} \right)} \right|. \quad (21)$$

Из (21) видно, что с увеличением угла натекания потока K_n^k уменьшается, так как существенно растет циркуляция ускорения с ростом циркуляции скорости, что приводит к снижению аэродинамического качества. В римановой плоскости D_λ обтекания цилиндра это означает, что необходимо снижать большие градиенты скорости потока для достижения циркуляции, требуемой для выполнения условия Жуковского–Чаплыгина–Кутта о нулевой скорости в ЗКТ [16].

Таким образом, с учётом коэффициента природоподобия аэродинамического процесса взаимодействия профиля лопатки рабочего колеса с потоком воздуха, в римановой плоскости D_λ соответствует обтеканию цилиндра радиусом $r = a$, определяется по формуле:

$$\begin{aligned} K_n(\lambda) &= 1 - K_n^k(\lambda) + \Delta K_n^q(\lambda) = \\ &= 1 - \frac{|\sin 2\theta_\infty|}{\cos \theta_\infty} + \left(\frac{\cos(\theta_\infty - \theta_{kq}) - \cos(\theta_\infty - \theta_q)}{\sin(\theta_\infty - \theta_{kq}) - \sin(\theta_\infty - \theta_q)} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

Для каждого значения угла натекания потока θ_∞ при обтекании цилиндра на римановой плоскости D_λ всегда можно подобрать положение источника θ_q и связанное с ним через интенсивность положение критической точки θ_{kq} , при котором достигается максимальное значе-

ние коэффициента природоподобной соразмерности $K_n(\lambda q)$. При этом наибольший прирост эффективности, т.е. отношения прироста $K_n(\lambda q)$ к суммарной интенсивности источников q достигается при расположении источников по поверхности цилиндра от точки $\theta = \theta_m$ до $\theta = \theta_{ЗКТ}$ с переменной интенсивностью от $q = q_{\max}$ до $q = 0$.

С учётом (3)–(5), (22) получим:

$$K_n(\Delta\theta_\infty) = 1 - \int_{\Delta\theta_\infty} \left| \frac{2\sin\theta_\infty}{\cos\theta_\infty} \right| + \frac{\cos(\theta_\infty - \theta_{kq}) - \cos(\theta_\infty - \theta_q)}{\sin(\theta_\infty - \theta_{kq}) - \sin(\theta_\infty - \theta_q)} d\theta_\infty. \quad (23)$$

После преобразования получим формулу для расчета коэффициента природоподобной соразмерности в диапазоне режимов $\Delta\theta_\infty$ в римановой плоскости D_λ в виде:

$$K_n(\Delta\theta_\infty) = 1 - 2 \sin \frac{\Delta\theta_\infty}{2} + \ln \frac{\cos \frac{\delta\theta_{q\max}}{2} \sin \frac{\delta\theta_{q\max}}{2}}{\cos \frac{\delta\theta_{q\min}}{2} \sin \frac{\delta\theta_{q\min}}{2}}. \quad (24)$$

Таким образом, для обеспечения максимального значения $K_n(\Delta\theta_\infty)$ в заданном диапазоне режимов работ $\Delta\theta_\infty$ необходимо с учётом полученной математической модели, связывающей локальную диффузорность, циркуляцию потока, обтекающего цилиндр, положение и интенсивность источников, расположенных на его поверхностях, обеспечить в каждой точке на поверхности цилиндра за областью максимальной скорости потока максимально возможное значение циркуляции при минимальной диффузорности с соблюдением условия Жуковского–Чаплыгина–Кутта в ЗКТ. Фактически в области отрицательных градиентов скоростей должна быть сформирована замкнутая зона постоянного давления за счёт расположения и заданной интенсивности источников, обеспечивающих требуемое значение циркуляции, исключая отрыв потока, т.е. обеспечивая его плавный сход с задней кромки профиля.

Чем больше диапазон рабочих режимов $\Delta\theta_\infty$, тем большее количество источников необходимо располагать на поверхности цилиндра за точкой максимальной скорости потока для обеспечения максимального значения коэффициента природоподобной соразмерности $K_n(\Delta\theta_\infty)$.

В статьях [17–20] показано, что для классических профилей лопаток рабочих колес вентиляторов использование метода конформного

отображения профиля в физической плоскости D_z на внешнюю по отношению к кругу радиусом $r = a$ область вспомогательной римановой плоскости D_λ позволяет получить единственное решение гидродинамической задачи определения комплексного потенциала и, как результат, рассчитать параметры циркуляционного течения. При этом имеет место конформное отображение односвязной однолистной области плоскости D_z на односвязную однолистную область плоскости D_λ . В случае применения данного метода для изучения аэродинамики профилей лопаток с источниками либо стоками необходимо осуществить модификацию конформного отображения, поскольку в этом случае необходимо отображать $(n_n + 1)$ -листную односвязанную область D_z на однолистную односвязную область вне круга радиусом $r = a$, при этом установлено, что можно руководствоваться теоремой Римана для односвязных областей.

Таким образом, зная комплексный потенциал течения в римановой плоскости D_λ , полученный методом суперпозиции в виде составного комплексного потенциала циркуляционного обтекания цилиндра с источником на его поверхности $\Pi_q(\lambda)$, можно получить комплексный потенциал в физической плоскости течения (см. рис. 1), математически описывающий аэродинамическое природоподобие процесса обтекания профиля лопатки рабочего колеса на среднем геометрическом радиусе с учётом принципа гидродинамической аналогии в виде параметрической зависимости от λ .

Задача имеет единственное решение, если обтекание в физической плоскости D_z характеризуется наличием трёх критических точек: ПКТ, ЗКТ и QКТ – критическая точка, обусловленная влиянием на течения вокруг профиля от источника, расположенного в точке $z_q(\lambda_q)$.

Изменяя положения источника z_q , его интенсивность, что влияет на положение критической точки z_{qk} , изменяем циркуляцию вокруг профиля лопатки, управляя при этом циркуляцией ускорения, т.е. локальной диффузорностью, обеспечивая плавное обтекание при изменении параметров набегающего потока θ_∞ .

3. Обсуждение результатов

Таким образом, в физической плоскости течения D_z можно выделить 2 характерных участка на профиле лопатки, определяющие его коэффициент природоподобной соразмерности:

1. Участок максимального роста циркуляции потока за счет утолщения профиля и увеличения кривизны его средней линии расположен от ПКТ до точки максимальной скорости потока на его рабочей поверхности (16);

2. Участок с источниками, распределенными от точки максимальной скорости до задней критической точки (16), соответствующий замкнутой области постоянного давления, создаваемой за счёт подачи управляющего потока через аэродинамические каналы источников для исключения больших градиентов диффузорности и схода потока до задней кромки профиля, обусловленных кинематической диффузорностью, связанной с геометрией профиля и углом атаки.

Использование модификации конформного преобразования и принципа суперпозиции с учётом предложенной гипотезы о зависимости между отношением циркуляции ускорения и скорости вокруг профилей лопаток вентилятора и аэродинамическим качеством при изменении внешних факторов позволило получить математическую модель управления коэффициентом природоподобной соразмерности. Доминантой управления является распределение интенсивности по профилям источников q , которая определяется из условия обеспечения минимальных значений диффузорности.

Предложенная гипотеза позволяет свести задачу проектирования профилей лопаток рабочего колеса вентилятора с максимальной экономичностью в заданном диапазоне режимов её работы $\Delta\theta_\infty$ как основного показателя назначения к задаче определения оптимального значения параметров источников на их поверхности $q(\theta)$ из условия максимального значения коэффициента природоподобной соразмерности.

Для подтверждения достоверности предложенной гипотезы на аэродинамическом стенде, удовлетворяющем требованиям ГОСТ 10921–17, были проведены испытания классических профилей и профилей с источниками на рабочей поверхности с учётом того, что отношение циркуляции скорости и ускорения вокруг профилей является гидродинамическим аналогом их аэродинамических качеств.

С учетом формул (4), (5) выражение для интегрального коэффициента аэродинамического качества профиля примет вид [29]:

$$k_a = \int_{\theta_{\infty 1}}^{\theta_{\infty 2}} \frac{k_{a\theta\infty} d\theta_\infty}{k_{a\theta\max} \cdot \Delta\theta_\infty}. \quad (25)$$

На рис. 2 приведены графики изменения коэффициента природоподобной соразмерности профиля лопатки рабочих колес вентиляторов от диапазона изменения режима работы, определяемого углами атаки для различных положений источников и точки максимальной толщины профиля.

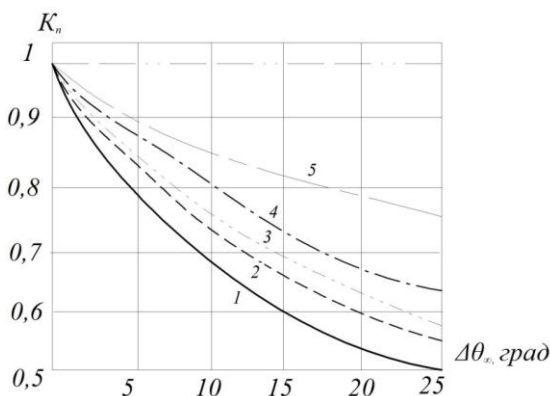


Рис. 2. Зависимость коэффициента природоподобной соразмерности профиля лопатки рабочего колеса вентилятора от диапазона изменения угла набегающего потока: 1 – классический профиль $\bar{x}_m = 0,35$; 2 – профиль со смещением к входной кромке максимальной толщины $\bar{x}_m = 0,18$; 3 – профиль с источником в точке на его поверхности, соответствующей $\bar{x} = \bar{x}_m$; 4 – профиль с двумя источниками $\bar{x}_1 = \bar{x}_m$; $\bar{x}_2 = \bar{x}_m/2$; 5 – профиль с тремя источниками $\bar{x}_1 = \bar{x}_m$, $\bar{x}_2 = \bar{x}_m/2$; $\bar{x}_3 = \bar{x}_m/3$

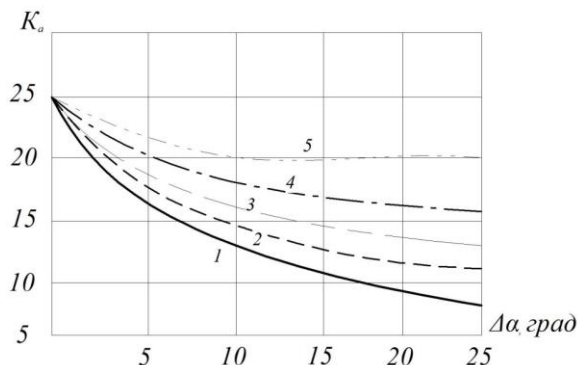


Рис. 3. Зависимость интегрального аэродинамического качества профиля на среднем аэродинамическом радиусе лопатки рабочего колеса вентилятора от диапазона изменения угла набегающего потока: 1 – классический профиль $\bar{x}_m = 0,35$; 2 – профиль со смещением к входной кромке максимальной толщины $\bar{x}_m = 0,18$; 3 – профиль с источником в точке на его поверхности, соответствующей $\bar{x} = \bar{x}_m$; 4 – профиль с двумя источниками $\bar{x}_1 = \bar{x}_m$; $\bar{x}_2 = \bar{x}_m/2$; 5 – профиль с тремя источниками $\bar{x}_1 = \bar{x}_m$, $\bar{x}_2 = \bar{x}_m/2$; $\bar{x}_3 = \bar{x}_m/3$

Из анализов графиков видно, что наибольший прирост коэффициента природоподобной соразмерности обеспечивает профиль с тремя источниками. В диапазоне $\Delta\theta_{\infty} = 20^{\circ}$ прирост коэффициента превышает 45 %.

Приведенные на рис. 3 изменения интегральных коэффициентов аэродинамического качества подтверждают его соответствие коэффициенту природоподобной соразмерности:

Заключение

1. На базе теорем Гельмгольца, Коши, Кельвина, гидродинамической аналогии геометрической и кинематической диффузорности, модифицированной формулы Жуковского–Чаплыгина–Кутта применительно к профилям с источниками на их поверхности получена математическая модель расчета дополнительной циркуляции и коэффициента природоподобной соразмерности от параметров источника.

2. Экспериментально показано, что коэффициент природоподобной соразмерности является аналогом интегрального аэродинамического качества профиля лопатки рабочего колеса вентилятора.

3. Снижение максимальной толщины профиля лопатки рабочего колеса вентилятора в ее входной кромке в точке 18 % длины хода позволит увеличить коэффициент природоподобной соразмерности на 11 % в диапазоне углов $\Delta\theta_{\infty} = 20^{\circ}$.

4. Использование разработанной математической модели позволило спроектировать профиль с распределенными источниками, имеющими в диапазоне рабочих режимов угла атаки до 20° на 45 % большее значение как аэродинамического качества, так и природоподобной соразмерности.

5. На базе разработанной с использованием математической модели аэродинамической схемы OV122Т изготовлен опытно-промышленный образец вентиляторной установки ВУ 2.7-КЗ для АВО, КПД которого на 8 % превышает аналогичный параметр вентиляторов фирмы ГЕО.

Библиографический список

1. Рубцова И.Е., Мочалин Д.С., Крюков О.В. Основные направления и задачи энергосбережения при реконструкции КС. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных стан-

ций: монография; под ред. О.О. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2012. – Т. 3. – 572 с.

2. Abakumov A.M., Stepashkin I.P. Research of the adaptive automatic control system at the natural gas air – cooling unit // IEEE Xplore. – 2017. DOI: 10/1109/ICIEAM.2017.8076297

3. Математическая модель управления локальной диффузорностью адаптивных шахтных турбомашин / В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, А.В. Угольников, А.А. Арсланов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 248–257. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_239

4. Основные конкурентные преимущества АВО газа типа «Айсберг». – Воронеж: Научная книга, 2019. – С. 60–70.

5. Обоснование параметров и создание высокоэкономичных вентиляторных установок аппаратов воздушного охлаждения / Н.В. Макаров, В.Н. Макаров, А.В. Угольников, М.Б. Носырев // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – № 1 (51). – С. 117–125.

6. Novakovsky N.S., Bautin S.P. Numerical simulation of shock-free strong compression of gas layer // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 894, no. 1. – P. 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/12067

7. Хворов Г.А. Юмашев М.В. Анализ энергосберегающих технологий по материалам охлаждения газа на основе аппаратов воздушного охлаждения в транспорте газа ПАО «Газпром» // Территория Нефтегаз. – 2016. – № 9. – С. 3–12.

8. Kychkin A., Nikolaev A. IOT-based mine ventilation control system architecture with digital twin // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 May 2020. – New York: IEEE, 2020. – Art. 9111995. – 5 p.

9. Abakumov A.M., Stepashkin I.P. Research of the adaptive automatic control system at the natural gas air – cooling unit // IEEE Xplore. 2017. DOI: 10/1109/ICIEAM.2017.8076297

10. Калинин А.Ф., Фомин А.В. Оценка эффективности режимов работы АВО // Труды РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2011. – № 4 (265). – С. 131–139.

11. Январев И.А. Комбинированный способ регулирования температурных режимов модульной установки воздушного охлаждения газа // Омский научный вестник. – 2014. – № 22 (130). – С. 161–165.

12. Шабанов В.А., Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Анализ потерь электроэнергии в электроприводе аппарата воздушного охлаждения газа // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10, № 1. – С. 18–24.

13. Оптимизация параметров вентиляторных установок аппаратов воздушного охлаждения газа / Н.В. Макаров, В.Н. Макаров, А.В. Угольников, М.Б. Носырев // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13, № 3 (49). – С. 433–440. DOI: 10.211777/1998-4502-2021-13-3-433-440

14. Оптимизация параметров вентиляторных установок для АВО газа / Н.П. Косарев, В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, А.М. Бельских // Известия высших учебных заведений // Горный журнал. – 2021. – № 8. – С. 45–54. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-45-54

15. Davydov S.Y., Valiev N.G., Tayger V.M. Effect of the flow of transported bulk. Materual on design features of a belt conveyor // Refractories and Indyustrual Ceramics. – 2019. – No. 60 (1). – P. 10–13.

16. Хворов Г.А., Юмашев М.В. Анализ энергосберегающих технологий по материалам охлаждения газа на основе аппаратов воздушного охлаждения в транспорте газа ПАО «Газпром» // Территория нефтегаз. – 2016. – № 91. – С. 127–132.

17. Improving the quality of the oxygen-converter shop of metallurgical production / G. Kornilov, O. Gazizova, A. Bunin, M. Bulanov, A.L. Karyakin // Proceeding – ICOECS 2019: 2019 International Conference on Electrotechical Complexes and Systems. – 2019. – P. 8949928.

18. Макаров Н.В., Макаров В.Н. Разработка аддитивной математической модели и создание на ее основе высоконапорных адаптивных вентиляторов местного проветривания // Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – No. 262. – 012045 p. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012045

19. Модификация вихревой теории круговых решеток турбомашин / Н.В. Макаров, В.Н. Макаров, А.В. Лифанов, А.В. Угольников, В.М. Таугер // ГИАБ. – 2019. – № 10. – С. 206–214. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-184-194

20. Torshizi S.A.M., Benisi A.H., Durali M. Multilevel Optimization of the Spiltter Blade Profile in the Impeller of a Centrifugal Compressor // Scientia Irenica. – 2017. – No. 24. – P. 707–714.

21. Математическая модель активного управления циркуляционным течением в шахтных вентиляторах / В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, Е.О. Чураков, М.В. Молчанов // ГИАБ. – 2021. – № 11-1. – С. 239–247. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_239

22. Лойцанский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

23. Makarov N.V., Makarov V.N., Franyuk E.E. Development of mathematical model of circular grill of piece-smooth profiles and creation on its basis of gas-sucting fans // 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 272 032075. DOI: 10.1088/1755-1315/272/3/032075

24. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) = ICIEAM 2020: proceedings, Sochi, Russian Federation, 18-22 May 2020. – New York: IEEE, 2020. – Art.0111995. – 5 p.

25. Torshizi S.A.M., Benisi A., Durali M. Multilevel optimization of the splitter blade profile in the impeller of a centrifugal compressor // Scientia Iranica. – 2017. – No. 24. – P. 707–714.

26. Ванчин А.Ф. Методы оценки работы аппаратов воздушного охлаждения газа при разных вариантах включения вентиляторов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журнал. – 2018. – № 3. – URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19749>

27. Мигачев А.А., Потемкин В.А., Степашкин И.П. Параметрическая идентификация аппарата воздушного охлаждения газа как объекта управления // Актуальные исследования гуманитарных, естественных, общественный наук: материалы VIII Всерос. с междунар. участ. науч.-практ. конф. – Новосибирск: ООО «ЦРНСИ», 2016. – С. 23–28.

28. Nikolaev A.V. Energy-efficient air conditioning in shallow mines // Gornyi Zhurnal. – 2017. – No. 3. – P. 71–74.

29. Брусиловский И.В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 240.

30. Wang P. Multi – objective design of a transonic turbocharger compressor with reduced noise and increased efficiency. Ph.D. Thesis. UCL University, London, 2017, 213 p.

31. Брусиловский И.В. Аэродинамический расчет осевых вентиляторов. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 288.

32. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control / D. Wu, K. Yin, Q. Yin, X. Zhang, J. Cheng., D. Ge, P. Zhang // *Applied sciences (Switzerland)*. – 2017. – Т. 7, no. 1. – P. 5–20. DOI: 10.3390/APP7010005

33. Torshizi S.A.M., Benisi A.H., Durali M. Numerical Optimization and Manufacturing of the Impeller of a Centrifugal Compressor by Variation of Spiler Blades // *ASMVE Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Scoil*, 13–17 June 2016. – P. 1–7.

34. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control / D. Wu, K. Yin, Q. Yin, Zhang, J. Cheng., Ge, P. Zhang // *Applied sciences (Switzerland)*. – 2017. – Vol. 7, no. 1. – P. 5–20. DOI: 10.3390/APP7010005

35. MAO Y.F. Numerical Study of Correlation between the Surge of Centrifugal Compressor and the Pipind System. Ph. D, Thesis, {I'an Jiaodong University, Xi'an. (In Chenese) (2016).

36. Ivanov A.V., Strizhenok A.V. Efficiency of Dust Suppression with Aerosol Gung=s-Fogging Machines with Air-and-Fluid Jets // *Journal of Mining Science*. – 2017. – Vol. 53, no. 1. – P. 176–180. DOI: 10.1134/S1062739117011994

37. Kovshov S.V., Kocshov V.P. Aerotechnogenic evaluation of the drilling rig operator workplace at the open-pit coal mine // *Ecology, Enviromnet and Conservation*. – 2017. – Vol. 23, no. 2. – P. 897–902.

References

1. Rubtsova I.E., Mochalin D.S., Kriukov O.V. Osnovnye napravleniia i zadachi energosberezheniia pri rekonstruktsii KS. Energosberezhenie i avtomatizatsiia elektrooborudovaniia kompressornykh stantsii [The main directions and tasks of energy saving in the reconstruction of CS. Energy saving and automation of electrical equipment of compressor stations]. Ed. O.O. Kriukov. N. Novgorod: Vektor TiS, 2012, vol. 3, 572 p.

2. Abakumov A.M., Stepashkin I.P. Research of the adaptive automatic control system at the natural gas air - cooling unit. *IEEE Xplore*, 2017. DOI: 10/1109/ ICIEAM.2017.8076297

3. Makarov V.N., Makarov N.V., Ugol'nikov A.V., Arslanov A.A. Matematicheskaiia model' upravleniia lokal'noi diffuzornost'iu adaptivnykh shakhtnykh turbomashin [Mathematical model of control of local diffusivity of

adaptive mine turbomachines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2021, no. 11-1, pp. 248-257. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_239

4. Osnovnye konkurentnye preimushchestva AVO gaza tipa "Aisberg" [The main competitive advantages of AVO gas type "Iceberg"]. Voronezh: Nauchnaia kniga, 2019, pp. 60-70.

5. Makarov N.V., Makarov V.N., Ugol'nikov A.V., Nosyrev M.B. Obosnovanie parametrov i sozдание vysokoekonomichnykh ventilatornykh ustanovok apparatov vozdushnogo okhlazhdeniia [Justification of parameters and creation of highly economical fan installations of air cooling devices]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii*, 2022, no. 1 (51), pp. 117-125.

6. Novakovskiy N.S., Bautin S.P. Numerical simulation of shock-free strong compression of gas layer. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 894, no. 1, 012067 p. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/12067

7. Khvorov G.A. Iumashev M.V. Analiz energosberegaiushchikh tekhnologii po materialam okhlazhdeniem gaza na osnove apparatov vozdushnogo okhlazhdeniia v trasporte gaza PAO "Gazprom" [Analysis of energy-saving technologies based on gas cooling materials based on air cooling apparatuses in the gas transport of Gazprom PJSC]. *Territoriiia Neftegaz*, 2016, no. 9, pp. 3-12.

8. Kychkin A., Nikolaev A. IOT-based mine ventilation control system architecture with digital twin. *2020 Internation Conference on Indyltrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18-22 May 2020*. New York: IEEE, 2020, Art. 9111995, 5 p.

9. Abakumov A.M., Stepashkin I.P. Research of the adaptive automatic control system at the natural gas air - cooling unit. *IEEE Xplore*. 2017. DOI: 10/1109/ICIEAM.2017.8076297

10. Kalinin A.F., Fomin A.V. Otsenka effektivnosti rezhimov raboty AVO [Evaluation of the efficiency of AVO operating modes]. *Trudy Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I.M. Gubkina*, 2011, no. 4 (265), pp. 131-139.

11. Ianvarev I.A. Kombinirovannyi sposob regulirovaniia temperaturnykh rezhimov modul'noi ustanovki vozdushnogo okhlazhdeniia gaza [Combined method of temperature control of modular gas air cooling unit]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2014, no. 22 (130), pp. 161-165.

12. Shabanov V.A., Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Analiz poter' elektroenergii v elektroprivode apparata vozdushnogo okhlazhdeniia gaza

[Analysis of electricity losses in the electric drive of the gas air cooling unit]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2014, vol. 10, no. 1, pp. 18-24.

13. Makarov N.V., Makarov V.N., Ugol'nikov A.V., Nosyrev M.B. Optimizatsiia parametrov ventilatornykh ustanovok apparatov vozdushnogo okhlazhdeniia gaza [Optimization of parameters of fan installations of gas air cooling devices. Sustainable development of mountain territories]. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii*, 2021, vol. 13, no. 3 (49), pp. 433-440. DOI: 10.211777/1998-4502-2021-13-3-433-440

14. Kosarev N.P., Makarov V.N., Makarov N.V., Bel'skikh A.M. Optimizatsiia parametrov ventilatornykh ustanovok dlia AVO gaza [Optimization of parameters of fan installations for AVO gas]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2021, no. 8, pp. 45-54. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-45-54

15. Davydov S.Y., Valiev N.G., Tayger V.M. Effect of the flow of transported bulk. Material on design features of a belt conveyor. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2019, no. 60 (1), pp. 10-13.

16. Khvorov G.A., Iumashev M.V. Analiz energosberegaiushchikh tekhnologii po materialam okhlazhdeniia gaza na osnove apparatov vozdushnogo okhlazhdeniia v transporte gaza PAO "Gazprom" [Analysis of energy-saving technologies based on gas cooling materials based on air cooling devices in gas transport of Gazprom PJSC]. *Territoriia neftegaz*, 2016, no. 91, pp. 127-132.

17. Kornilov G., Gazizova O., Bunin A., Bulanov M., Karyakin A.L. Improving the quality of the oxygen-converter shop of metallurgical production. *Proceeding - ICOECS 2019: 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2019, 8949928 p.

18. Makarov N.V., Makarov V.N. Razrabotka additivnoi matematicheskoi modeli i sozdanie na ee osnove vysokonapornyykh adaptivnykh ventilatorov mestnogo provetrivaniia [Development of an additive mathematical model and creation on its basis of high-pressure adaptive fans of local ventilation]. *Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, no. 262, 012045 p. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012045

19. Makarov N.V., Makarov V.N., Lifanov A.V., Ugol'nikov A.V., Tauger V.M. Modifikatsiia vikhrevoi teorii krugovykh reshetok turbomashin [Modification of the vortex theory of circular gratings of

turbomachines]. *GIAB*, 2019, no. 10, pp. 206-214. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-184-194

20. Torshizi S.A.M., Benisi A.H., Durali M. Multilevel Optimization of the Splitter Blade Profile in the Impeller of a Centrifugal Compressor. *Scientia Iranica*, 2017, no. 24, pp. 707-714.

21. Makarov V.N., Makarov N.V., Churakov E.O., Molchanov M.V. Matematicheskaiia model' aktivnogo upravleniia tsirkulatsionnym techeniem v shakhtnykh ventilatorakh [Mathematical model active control of the circulation flow in shaft fans]. *GIAB*, 2021, no. 11-1, pp. 239-247. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_239

22. Loitsanskii L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of liquid and gas]. 7nd ed. Moscow: Drofa, 2003, 840 p.

23. Makarov N.V., Makarov V.N., Franyuk E.E. Development of mathematical model of circular grill of piece-smooth profiles and creation on its basis of gas-sucting fans. *2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 272 032075. DOI: 10.1088/1755-1315/272/3/032075

24. IoT-based mine ventilation control system architecture with digita; twin / A. Kychkin, A.Nikolaev // 2020 International Conferense on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) = ICIEAM 2020: proceedings, Sochi, Russian Federatoin, 18-22 May 2020. – New York: IEEE, 2020. – Art.0111995. – 5 p.

25. Torshizi S.A.M., Benisi A., Durali M. Multilevel optimization of the splitter blade profile in the impeller of a centrifugal compressor. *Scientia Iranica*, 2017, no. 24, pp. 707-714.

26. Vanchin A.F. Metody otsenki raboty apparatov vozdušnogo okhlazhdeniia gaza pri roznykh variantakh vklucheniia ventilatorov [Methods of evaluating the operation of gas air cooling devices with multiple options for turning on fans]. *Neftgazovoe delo. Elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2018, no. 3, available at: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19749>

27. Migachev A.A., Potemkin V.A., Stepashkin I.P. Parametricheskaiia identifikatsiia apparata vozdušnogo okhlazhdeniia gaza kak ob"ekta upravleniia [Parametric identification of the gas air cooling apparatus as a control object]. *Aktual'nye issledovaniia gumanitarnykh, estestvennykh, obshchestvennykh nauk. Materialy VIII Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Novosibirsk: OOO "TsRNSI", 2016, pp. 23-28.

28. Nikolaev A.V. Energy-efficient air conditioning in shallow mines. *Gornyi Zhurnal*, 2017, no. 3, pp. 71-74.
29. Brusilovskii I.V. Aerodinamicheskie skhemy i kharakteristiki osevykh ventilatorov [Aerodynamic schemes and characteristics of axial fans]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 240 p.
30. Wang P. Multi - objective design of a transonic turbocharger compressor with reduced noise and increased efficiency. Ph. D. Thesis. UCL University, London, 2017, 213 p.
31. Brusilovskii I.V. Aerodinamicheskii raschet osevykh ventilatorov [Aerodynamic calculation of axial fans]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 288 p.
32. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control. *Applied sciences (Switzerland)*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 5-20. DOI: 10.3390/APP7010005
33. Torshizi S.A.M., Benisi A.H., Durali M. Numerical Optimization and Manufacturing of the Impeller of a Centrifugal Compressor by Variation of Spiler Blades. *ASMVE Turbo Expo: Turbomachinesy Technical Conference and Exposition, Scoil*, 13-17 June 2016, pp. 1-7.
34. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control / D. Wu, K. Yin, Q. Yin, Zhang, J. Cheng., Ge, P. Zhang // *Applied sciences (Switzerland)*. – 2017. – Vol. 7, no. 1. – P. 5–20. DOI: 10.3390/APP7010005
35. MAO Y.F. Numerical Study of Correlation between the Surge of Centrifugal Compressor and the Pipind System. Ph. D, Thesis, {I'an Jiaodong University, Xi'an. (In Chenese) (2016).
36. Ivanov A.V., Strizhenok A.V. Efficiency of Dust Suppression with Aerosol Gung=s-Fogging Machines with Air-and-Fluid Jets. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 176-180. DOI: 10.1134/S1062739117011994
37. Kovshov S.V., Kocshov V.P. Aerotechnogenic evaluation of the drilling rig operator workplace at the open-pit coal mine. *Ecology, Enviromnet and Conservation*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 897-902.

Сведения об авторах

Макаров Николай Владимирович (Екатеринбург, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Горная механика» Уральского государственного горного университета (620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: mnikolay84@mail.ru).

Макаров Владимир Николаевич (Екатеринбург, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Горная механика» Уральского государственного горного университета (620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com).

Таланкин Николай Николаевич (Екатеринбург, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Горная механика» Уральского государственного горного университета (620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: bakalavr19952020@yandex.ru).

Ахметов Рустам Гумарович (Житикара, Республика Казахстан) – главный механик АО «Костанайские минералы» (110700, Республика Казахстан, Костанайская область, Житикара, ул. Ленина, 67, e-mail: info@km.kz).

Хайрулин Рустам Ильдусович (Екатеринбург, Российская Федерация) – директор Фонда жилищного развития «Уралтрансгаз-Жилстрой» (620026, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 95).

About the authors

Nikolay V. Makarov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mining Mechanics Ural State Mining University (620144, Yekaterinburg, 30, Kuibyshev str., e-mail: mnikolay84@mail.ru).

Vladimir N. Makarov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Mining Mechanics Ural State Mining University (620144, Yekaterinburg, 30, Kuibyshev str., e-mail: uk.intelnedra@gmail.com).

Nikolay N. Talankin (Yekaterinburg, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Mining Mechanics Ural State Mining University (620144, Ekaterinburg, 30, Kuibysheva str., e-mail: bakalavr19952020@yandex.ru).

Rustam G. Akhmetov (Zhitikara, Republic of Kazakhstan) – Chief Mechanic JSC "Kostanay Minerals" (110700, Zhitikara, 67, Lenin str., e-mail: info@km.kz).

Rustam I. Khairulin (Yekaterinburg, Russian Federation) – Director Housing Development Fund "Uraltransgaz-Zhilstroy" (620026, Yekaterinburg, 95, Kuibysheva str.).

Поступила: 13.11.2023. Одобрена: 01.12.2023. Принята к публикации: 10.12.2023.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Доминанта повышения эффективности аппаратов воздушного охлаждения для нефтегазового комплекса / В.Н. Макаров, Р.И. Хайруллин, Н.В. Макаров, Р.Г. Ахметов, Н.Н. Таланкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 48. – С. 98–126. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.05

Please cite this article in English as:

Makarov V.N., Khairulin R.I., Makarov N.V., Akhmetov R.G., Talankin N.N. The dominant of increasing the efficiency of air-cooling devices for the oil and gas complex. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2023, no. 48, pp. 98-126. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.05