

## Совершенствование вентиляторов для аппаратов воздушного охлаждения на базе природоподобной соразмерности

Макаров В. Н.<sup>1</sup>, Бельских А. М.<sup>1</sup>, Макаров Н. В.<sup>1\*</sup>,  
Чураков Е. О.<sup>1</sup>, Дылдин Г. П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

\*e-mail: mnikolay84@mail.ru

### Реферат

**Актуальность.** В статье показана своевременность применения в лопатках рабочих колес вентиляторов для аппаратов воздушного охлаждения профилей с распределенными источниками и смещенной к входной кромке максимальной толщиной.

**Цель исследований** – разработка математической модели и алгоритма совершенствования вентиляторов для аппаратов воздушного охлаждения за счет повышения коэффициента природоподобной соразмерности профилей лопаток рабочих колес.

**Методика проведения исследования.** При работе использовалась природоподобная соразмерность для оптимизации параметров профилей лопаток рабочих колес вентиляторов. Расчет коэффициента природоподобия базируется на теоремах Гельмгольца, Коши, Кельвина, гидродинамической аналогии геометрической и кинематической диффузорности, модификации метода конформных отображений и формулы Жуковского–Чаплыгина–Кутта применительно к профилям с источниками на их поверхности.

**Результаты.** Построена математическая модель зависимости циркуляции скорости и циркуляции ускорения потока воздуха, обтекающего профиль лопатки рабочего колеса, от параметров и положения источников на его поверхности. Получены коэффициенты природоподобной соразмерности профилей лопаток рабочих колес вентиляторов. Установлена связь между геометрической и кинематической диффузорностью при обтекании профиля лопатки.

**Выводы.** Доказано, что доминантой управления коэффициентом природоподобной соразмерности обтекания профиля лопатки является функция распределения интенсивности источника по рабочей поверхности за областью максимальной скорости течения потока. На базе разработанной математической модели спроектирована аэродинамическая схема профиля лопатки со смещенной на 48 % точкой максимальной толщины и заданной функцией распределения интенсивности источников, имеющая аэродинамическое качество в 1,9 раза выше классического профиля, в диапазоне углов атаки от 0° до 40°. Создана вентиляторная установка ВУ2,5–0,6К4 по аэродинамической схеме ОУ-121У для аппаратов воздушного охлаждения с КПД в области рабочих режимов 0,75, что на 10 % выше показателей наиболее совершенных вентиляторов фирмы «Хадсон».

**Ключевые слова:** природоподобная соразмерность; профиль лопатки; вентилятор; энергоэффективность; струйное управление течением; циркуляция скорости; адаптивность.

**Введение.** Значительные колебания параметров технологической среды требуют адекватного оперативного изменения режимов работы вентиляторов в аппаратах воздушного охлаждения (АВО), т. е. обуславливают необходимость их высокой адаптивности [1–3].

В статье предложена методика создания энергоэффективных профилей лопаток рабочего колеса вентиляторов с использованием коэффициента природоподобной соразмерности, определяющего в качестве доминанты управления природоподобием процесса преобразования механической энергии турбомашин во внутреннюю энергию воздушного потока, соотношение между циркуляциями скорости и ускорения потока вокруг профилей лопаток ее рабочего колеса [4–6].

Взаимодействие потока воздуха с лопатками рабочего колеса вентилятора осуществляется через устойчивую вихревую дорожку, формируемую системой присоединенных вихрей, являющуюся гидродинамическим аналогом профиля лопаток [7, 8]. При изменении аэродинамических параметров технологической среды, на которые рассчитан вентилятор, происходит деформация вихревой системы, являющейся гидродинамическим аналогом циркуляции скорости, т. е. распределения давления согласно теореме Остроградского–Гаусса, до ее разрыва включительно, и, как результат, снижение интенсивности присоединенных вихрей [9]. Одновременно со снижением циркуляции происходит рост потерь давления на отрывное вихреобразование, обусловленное возникновением локальной диффузорности, снижением скоростей, т. е. резким возрастанием отрицательной циркуляции ускорения потока, и, как результат, формирование вихревой дорожки Кармана [10].

Обусловленное градиентом давления локальное изменение скорости более допустимой величины, т. е. отрицательная циркуляция ускорения, приводит к торможению потока до скорости, равной 0, т. е. 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 может быть представлена в виде:

$$D_k^a = 1 - \frac{\partial \bar{y}(x)}{\partial x} = 1 + \frac{\partial \bar{V}(x)}{\partial x}, \quad (1)$$

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

Это принципиально важно для достижения максимальной энергоэффективности вентиляторов на номинальном режиме их работы. Однако учитывая высокие требования к адаптивности вентиляторов для горно-металлургических и нефтегазовых комплексов РФ, это еще более важно в силу широкого изменения режимов их работы, обусловленных изменением параметров технологического процесса [11].

**Постановка задачи, методика исследований.** В основу алгоритма совершенствования вентиляторов для АВО на базе принципа природоподобной соразмерности аэродинамики профилей лопаток рабочего колеса вентилятора положена научная гипотеза о доминантном управлении отношением циркуляции скорости потока и циркуляции его ускорения на каждом отрезке профилей лопаток при стремлении его длины к нулю, т. е. локальной диффузорностью, определяющей эффективность

преобразования механической энергии вращающегося рабочего колеса во внутреннюю энергию потока.

Раздельное управление циркуляцией скорости и циркуляцией ускорения потока вокруг профиля лопатки возможно за счет распределения источников на нем с интенсивностью  $q(x)$ , характеризующегося функцией распределения интенсивности источников. В этом случае формула (1) для расчета локальной диффузорности примет вид:

$$D_n^n = 1 - \frac{\partial(\bar{V} - \bar{q}(x))}{\partial x} = 1 + \frac{\partial \bar{y}(x)}{\partial x} + \frac{\partial \bar{q}(x)}{\partial x},$$

где  $\bar{q}(x) = \frac{\bar{q}(x)}{Q}$  – относительная интенсивность источника на поверхности профиля лопатки,  $q(x)$  – интенсивность источника, м<sup>3</sup>/с,  $Q$  – производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с.

Таким образом, распределение интенсивности источников устраняет жесткую корреляцию геометрических параметров профиля лопаток 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 локальной диффузорности, фактически с устранением формирования отрывного течения потока, т. е. вихревой дорожки Кармана как основной причины снижения энергетической эффективности взаимодействия лопаток рабочего колеса и потока воздуха.

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 учетом теоремы Кельвина и принципа суперпозиции выразим в виде:

$$k_n^\lambda(a) = k_n^k(a) + k_n^q(a) = - \frac{|\gamma_{a(a)}|}{\gamma_{(a)}} = - \frac{D_n^n(a)}{(\bar{V}(a) + \bar{q}(a))^2}, \quad (2)$$

где  $k_n^k(a)$  – локальный коэффициент природоподобия классического профиля;  $k_n^q(a)$  – локальный коэффициент природоподобия от действия источника в точке  $x_a, y_a$  на поверхности профиля, дополнительная сингулярная составляющая локального коэффициента природоподобия;  $\gamma_{(a)}, \gamma_{a(a)}$  – коэффициенты циркуляций скорости потока и его ускорения в окрестности точки  $x_a, y_a$  на длине профиля  $\Delta x = 1$ ;  $\bar{q}(a)$  – относительная интенсивность источника в окрестности  $x_a, y_a$  на профиле;  $D_n^n(a)$  – локальная диффузорность потока в точке  $x_a, y_a$  на профиле;  $\bar{V}(a)$  – относительная скорость потока в точке  $x_a, y_a$  на профиле.

Учитывая, что скорость потока и его циркуляция на профиле унимодальны, формулу (2) 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  $x = x_{зкт}$  характеризуется тем, что в ней вторая производная комплексного потенциала скорости обтекания имеет отрицательное значение.

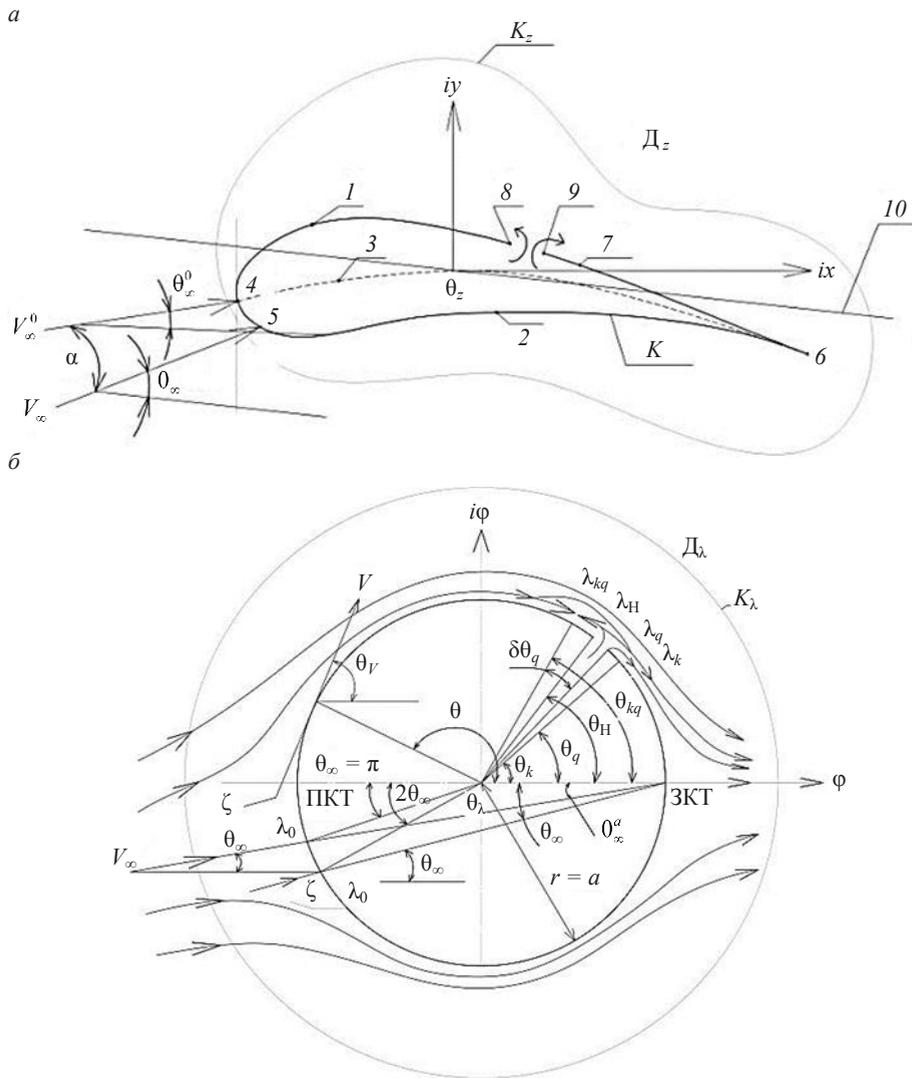


Рисунок 1. Аэродинамический профиль лопатки рабочего колеса вентилятора с источником на рабочей поверхности – *a* и его конформное отображение на цилиндр радиуса *r* в Римановой плоскости  $D_\lambda$  – *b*: 1 – рабочая поверхность; 2 – тыльная поверхность; 3 – средняя линия профиля; 4, 5 – передняя крайняя точка при  $V_\infty^0$  и  $V_\infty$ ; 6 – задняя крайняя точка; 7 – точка отрыва потока; 8, 9 – границы источника; 10 – линия бесциркуляционного обтекания профиля;  $D_z$  – физическая плоскость обтекания профиля;  $K_z, K_\lambda$  – замкнутые контуры, охватывающие контур *K* и цилиндр в областях  $D_z$  и  $D_\lambda$

Figure 1. Aerodynamic profile of the fan impeller blade with the source on the working surface – *a* and its conformal mapping to the cylinder of radius *r* in the Riemannian plane  $D_\lambda$  – *b*: 1 – working surface; 2 – rear surface; 3 – middle line of the profile; 4, 5 – forward terminal point under  $V_\infty^0$  and  $V_\infty$ ; 6 – rear stagnation point; 7 – flow break point; 8–9 – source boundaries; 10 – line of non-circulatory flow around profile;  $D_z$  – physical plane of profile flow;  $K_z, K_\lambda$  – closed contours enclosing contour *K* and cylinder in regions  $D_z$  and  $D_\lambda$

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

$$K_{\Pi}(\Delta\theta_{\infty})' = 1 - \int_{\Delta Q_{\infty}} \int_{x_m}^{x_{\text{ЗКТ}}} \frac{|\gamma_a(\bar{x})|}{\gamma(x)} dx d\theta_{\infty},$$

где  $\Delta\theta_{\infty}$  – диапазон рабочих режимов профиля;  $x_{\text{ЗКТ}}$  – координаты ЗКТ профиля.

Относительная скорость потока  $\bar{V}(\bar{x})$  зависит от геометрических параметров профиля лопатки и угла натекания потока  $\theta_{\infty}$ . Интенсивность и место расположения на профиле лопатки источника  $q(\bar{x})$  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, определяемое локальной диффузорностью, увеличивая при этом циркуляцию потока, т. е. коэффициент природоподобия:

$$D_{\Pi}^n(x) = F\left(\gamma(\bar{x}), \frac{\partial q(\bar{x})}{\partial(x)}\right),$$

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

**Результаты исследования.** 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 [4, 5, 11].

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 учетом источника на поверхности цилиндра, имеет единственное решение.

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

Задачу отображения внешней по отношению к области  $K$  без источника физической плоскости  $D_z$  на внешнюю по отношению к кругу  $r = a$  вспомогательной области  $D_{\lambda}$  решаем с использованием метода конформного отображения [12].

Для классического обтекания цилиндра потоком воздуха в Римановой вспомогательной плоскости  $D_{\lambda}$  циркуляция в соответствии с интегралом Коши может быть выражена формулой [9, 12, 13]:

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\Pi(\lambda)}{d\lambda} d\lambda = |V_\infty| \exp\left(-\left(a - \theta_0^0\right)\right) \pi i. \tag{3}$$

Задача заключается в модификации метода конформных отображений в целях установления изменений обтекания круга радиусом  $r = a$  на вспомогательной Римановой плоскости  $D_\lambda$  за счет воздействия на него источников либо стоков, расположенных на окружности.

Для того чтобы воспользоваться теоремами Римана, Коши, принципами суперпозиции и гидродинамической аналогии, необходимо рассчитать комплексный потенциал течения, определяющий интенсивность источника на поверхности профиля лопатки. Интенсивность источника может быть представлена совокупностью особенностей, образованных источником с интенсивностью  $q(a)$ , расположенным в точке окружности, соответствующей отображению его положения с контура  $K_z$  физической области течения плоскости  $D_z$ , источника  $q(0)$  в точке  $z = 0$  и стока  $q(\infty)$  в точке  $z = \infty$ .

Уравнение для расчета комплексной скорости в любой точке цилиндра на Римановой плоскости  $D_\lambda$  получим в виде:

$$\frac{d\Pi_q(\lambda)}{d\lambda} = -4V_\infty \exp\left(\left(\theta_\infty - \frac{\theta_\infty^0}{2} - \frac{\delta\theta_{kg}}{2} + \frac{\theta_H + \theta_K}{4} + \theta\right) \cdot i\right) \frac{\frac{\sin\theta - \theta_0}{2} \frac{\sin\theta - \theta_{kg}}{2} \frac{\sin\theta}{2}}{\sqrt{\frac{\sin\theta - \theta_H}{2} \frac{\sin\theta - \theta_K}{2}}}, \tag{4}$$

где  $\Pi_q(\lambda) = \Pi(\lambda) + \Delta\Pi_q(\lambda)$ ;  $\theta_\infty$  – угол вектора скорости на бесконечности в областях  $D_z$  и  $D_\lambda$  с осями  $O_zx$  и  $O_\lambda\varphi$ ;  $\theta_0 = \pi + 2\theta_\infty + \theta_q - \theta_{kg}$  – полярный угол положения ПКТ на цилиндре с учетом действия источника в Римановой плоскости  $D_\lambda(\theta_{ПКТ})$ ,  $\theta_{kg}$  – полярный угол положения точки полного торможения потока на цилиндре от действия источника  $q(\lambda_q)$ , в Римановой плоскости  $D_\lambda$ ;  $\theta_H, \theta_K$  – полярные углы положения точек начала  $\lambda_H$  и конца  $\lambda_K$  источника  $q$  на Римановой плоскости  $D_\lambda$ ;  $\theta$  – текущий угол положения точек  $\lambda_\theta = re^{i\theta}$  на цилиндре в Римановой плоскости  $D_\lambda$ .

Показатель степенной функции в уравнениях (3), (4) определяет угол вектора скорости потока вокруг цилиндра в Римановой плоскости  $D_\lambda$  по отношению к оси  $O_zx$ , а модуль соответствует абсолютной величине скорости.

Учитывая, что течение безотрывное (рис. 1), получим величину условного смещения ПКТ от действия источника относительной интенсивности  $\bar{q}(\theta)$  на поверхности круга в Римановой плоскости  $D_\lambda$  в виде:

$$\delta\theta_q = \theta_0 - \pi - 2\theta_\infty = \theta_q - \theta_{kg}.$$

Таким образом, условное смещение ПКТ, определяющее кинематические параметры потока, обтекающего круг, а следовательно, и силовое взаимодействие, циркуляция потока, локальная диффузорность находятся в прямой зависимости от положения источника  $\lambda_q$  и его интенсивности, влияющих на положение критической точки  $\lambda_{kg}$ , т. е. точки полного торможения.

Принципиальная особенность изменения циркуляции вокруг цилиндра с источником на его поверхности в плоскости  $D_\lambda$  заключается в том, что ее увеличение

с ростом относительной интенсивности источника  $\bar{q}(\theta)$  обусловлено увеличением объема воздуха, обтекающего поверхность цилиндра, где расположен источник.

Таким образом, происходящее от действия источника на поверхности цилиндра увеличение циркуляции скорости потока не увеличивает его локальную диффузорность за точкой максимальной скорости  $\lambda_{V_{\max}}$  при условии, если интенсивность источника  $q(x) = |V(x)|$  компенсирует уменьшение скорости потока, обусловленное геометрией профиля и углом атаки, т. е. диффузорностью классического профиля  $D_k^{\lambda}$  согласно (1).

В этом случае выполняется условие:

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

Учитывая теорему Кельвина о постоянстве циркуляции по замкнутому контуру, в том числе и  $r \rightarrow \infty$ , получим:

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\Pi q(\lambda)}{d\lambda} d\lambda = V_{\infty} \exp\left((\theta_{\infty}^0 - \theta_{\infty})i\right) \left(\exp(\theta_k i) + \exp(\theta_0 i) - 2 \exp(\theta_{kq} i)\right) \pi i. \quad (5)$$

Сравнивая формулы (3), (5), можно обнаружить принципиальное отличие циркуляции потока воздуха классического профиля и профиля с источником.

Таким образом, изменение коэффициента циркуляции скорости потока при обтекании цилиндра с источником на его поверхности по сравнению с классическим обтеканием с учетом (5), т. е. дополнительного слагаемого в формуле Жуковского–Чаплыгина–Кутта, определяется по формуле [9, 14]:

$$\Delta \gamma_q^{\Pi} = \pi V_{\infty} r \left[ -2 \sin(\theta_{\infty} - \theta_{kq}) + \sin(\theta_{\infty} - \theta_H) + \sin(\theta_{\infty} - \theta_K) \right].$$

Относительная интенсивность источника, необходимая для получения данной величины коэффициента дополнительной циркуляции скорости потока, определяется по формуле:

$$\bar{q}^{\Pi} = \pi V_{\infty} r \left[ 2 \cos(\theta_{\infty} - \theta_{kq}) - \cos(\theta_{\infty} - \theta_H) - \cos(\theta_{\infty} - \theta_K) \right].$$

После преобразования получим формулу для расчета коэффициента природоподобной соразмерности в диапазоне режимов  $\Delta \theta_{\infty}$  в Римановой плоскости  $D_{\lambda}$  в виде:

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

Таким образом, для обеспечения максимального значения  $K_{\Pi}(\Delta \theta_{\infty})$  в заданном диапазоне режимов работ  $\Delta \theta_{\infty}$  необходимо с учетом полученной математической модели обеспечить в каждой точке на поверхности цилиндра за областью максимальной скорости потока максимально возможное значение циркуляции скорости при минимальной локальной диффузорности с соблюдением условия Жуковского–Чаплыгина–Кутта в ЗКТ.

Следовательно, для достижения минимальной диффузорности необходимо максимально смещать точку наибольшей толщины профиля к его входной кромке. Фактически в области отрицательных градиентов скоростей должна быть сформирована замкнутая зона постоянного давления за счет расположения в ней источников с интенсивностью, обеспечивающей постоянство скоростей, исключая тем самым отрыв потока.

В статьях [4–6, 16] показано, что 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  $(n_{ii} + 1)$ -лиственную односвязанную область  $D_{\Sigma}$  ( $n_{ii}$  – количество источников, где на однолиственную 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  $D_{\lambda}$ , 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 (рис. 1), математически описывающий аэродинамическое природоподобие процесса обтекания профиля лопатки рабочего колеса на среднем геометрическом радиусе с учетом принципа гидродинамической аналогии в виде параметрической зависимости от  $\lambda$ .

Задача имеет единственное решение, если обтекание в физической плоскости  $D_{\Sigma}$  характеризуется наличием трех критических точек: ПКТ (5), ЗКТ (6) и QKT (7) – критическая точка, обусловленная влиянием на течение вокруг профиля источника, расположенного в точке  $z_q(\lambda_q)$  (8, 9) на рис 1.

Изменяя положения источника  $z_q$  (8, 9), его интенсивность, что влияет на положение критической точки  $z_{qk}$  (8, 9), изменяем циркуляцию вокруг профиля лопатки, управляя при этом циркуляцией ускорения, т. е. локальной диффузорностью, обеспечивая плавное обтекание при изменении параметров набегающего потока  $\theta_{\infty}$ .

**Обсуждение результатов.** Использование модификации конформного преобразования и принципа суперпозиции с учетом предложенной гипотезы о зависимости между отношением циркуляций ускорения и скорости потока вокруг профилей лопаток вентилятора и его аэродинамическим качеством при изменении внешних факторов позволило получить математическую модель управления коэффициентом природоподобной соразмерности. Доминантой управления является функция распределения интенсивности источников  $\bar{q}(\bar{x})$  по рабочей поверхности профиля, которое определяется из условия обеспечения минимальных значений локальной диффузорности [15, 16].

Предложенная гипотеза позволяет свести задачу проектирования профилей лопаток рабочего колеса вентилятора с максимальной экономичностью в заданном диапазоне режимов ее работы  $\Delta\theta_{\infty}$  как основного показателя назначения для АВО, к задаче определения оптимального значения функции распределения интенсивности источников на их рабочей поверхности  $\bar{q}(\bar{x})$  из условия максимального значения коэффициента природоподобной соразмерности.

Для подтверждения достоверности предложенной гипотезы на аэродинамическом стенде, удовлетворяющем требованиям ГОСТ 10921-17, проведены испытания классических профилей и профилей с источниками на рабочей поверхности с учетом того, что отношение циркуляции скорости и циркуляции ускорения вокруг профилей является гидродинамическим аналогом их аэродинамического качества.

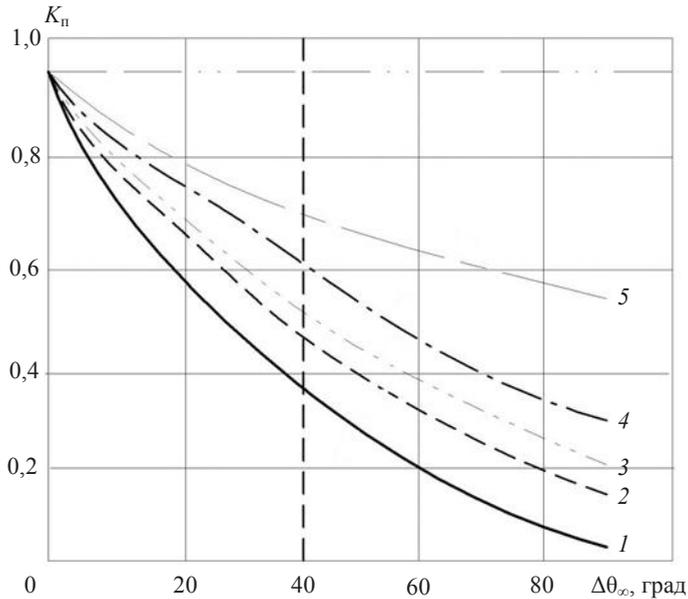


Рисунок 2. Зависимость коэффициента природоподобной соразмерности профиля лопатки рабочего колеса вентилятора ВУ2,5–К4 от диапазона изменения угла набегающего потока: 1 – классический профиль  $\bar{x}_m = 0,35$ ; 2 – профиль со смещением максимальной толщины к входной кромке  $\bar{x}_m = 0,18$ ; 3 – 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  $\bar{x}_1 = \bar{x}_m$ ;  $\bar{x}_2 = \bar{x}_m / 2$ ;  $\bar{x}_3 = \bar{x}_m / 3$

Figure 2. Dependence of the coefficient of nature-like proportionality of the VU2.5–K4 fan impeller blade profile on the range of change in the incident flow angle: 1 – classic profile  $\bar{x}_m = 0.35$ ; 2 – profile with maximum thickness shift to the leading edge  $\bar{x}_m = 0.18$ ; 3 – profile with a source at a point on its surface corresponding to  $\bar{x} = \bar{x}_m$ ; 4 – profile with two sources  $\bar{x}_1 = \bar{x}_m$ ;  $\bar{x}_2 = \bar{x}_m / 2$ ; 5 – profile with three sources  $\bar{x}_1 = \bar{x}_m$ ;  $\bar{x}_2 = \bar{x}_m / 2$ ;  $\bar{x}_3 = \bar{x}_m / 3$

На рис. 2 приведены графики изменения коэффициента природоподобной соразмерности профиля лопатки рабочих колес вентилятора ВУ2,5–К4 от диапазона изменения режима работы, определяемого углами набегающего потока для различных геометрических параметров и положения источников.

Из анализа графиков видно, что наибольший прирост коэффициента природоподобной соразмерности в диапазоне  $\Delta\theta_\infty = 40^\circ$ , равный 1,9, обеспечивает профиль с тремя источниками. Смещение максимальной толщины профиля лопатки к входной кромке в точку  $\bar{x}_m = 0,18$  позволяет повысить коэффициент природоподобной соразмерности на 22 % по отношению к классическому профилю.

На рис. 3 приведена аэродинамическая характеристика вентиляторной установки ВУ2,5–0,6К4 с профилями лопаток, выполненных по аэродинамической схеме

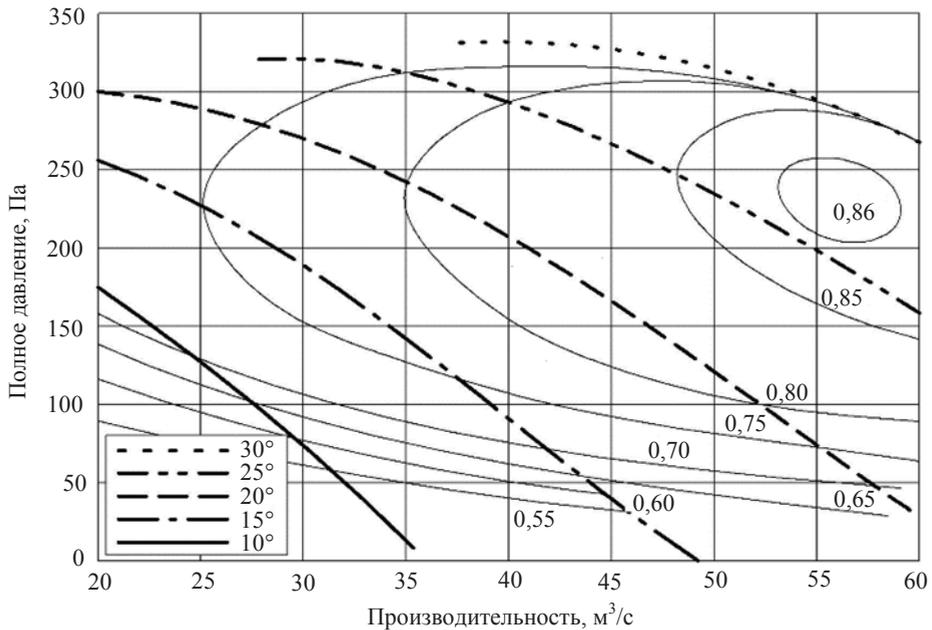


Рисунок 3. Аэродинамическая характеристика вентиляторной установки ВУ2,5–0,6К4, выполненной по аэродинамической схеме ОВ–121У

Figure 3. Aerodynamic characteristics of the VU2.5–0.6K4 fan unit made according to the OV-121U aerodynamic scheme

ОВ–121У, изолинии экономичности которых подтверждают, что для аппаратов воздушного охлаждения их КПД в области рабочих режимов составляют 0,75, что на 10 % выше, чем у вентилятора TV-14 фирмы «Хадсон» [17].

**Вывод.** На базе теорем Гельмгольца, Коши, Кельвина, гидродинамической аналогии, геометрической и кинематической диффузорности, модифицированного метода конформного отображения рассчитан коэффициент природоподобной соразмерности аэродинамического процесса взаимодействия профиля лопатки рабочего колеса вентилятора с источниками на его поверхности и потока обтекающего воздуха.

Доказано, что доминантой управления коэффициентом природоподобной соразмерности обтекания профиля лопатки является функция распределения интенсивности источников по рабочей поверхности за область максимальной скорости обтекания.

На базе разработанной математической модели спроектирована аэродинамическая схема профиля лопатки с распределенными источниками, имеющая аэродинамическое качество в 1,9 раза выше классического профиля, в диапазоне углов атаки от 0° до 40°.

Смещение положения максимальной толщины профиля лопатки рабочего колеса вентилятора для АВО в точку  $x = 0,18$  позволяет на 22 % повысить КПД в области рабочих режимов.

Создана вентиляторная установка ВУ2,5–0,6К4 по аэродинамической схеме ОВ-121У для аппаратов воздушного охлаждения с КПД в области рабочих режимов 0,75, что на 10 % выше вентилятора TV-14 фирмы «Хадсон».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ванчин А. Ф. Методы оценки работы аппаратов воздушного охлаждения газа при разных вариантах включения вентиляторов // Нефтегазовое дело. 2012. № 1. С. 279–286. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20725662>
2. Абакумов А. М., Степашкин И. П. Исследование адаптивной системы автоматического управления на установке воздушного охлаждения природного газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. «Технические науки». 2018. № 2. С. 92–100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=ydytj>
3. Кычкин А. В., Николаев А. В. Архитектура киберфизической системы управления проветриванием подземного горнодобывающего предприятия на базе платформы Интернета вещей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 3. С. 115–123.
4. Иванов А. В., Стриженов А. В. Исследование эффективности пылеподавления аэрозольными пушками-гуманообразователями с пневмогидравлическими форсунками // ФТПРПИ. 2017. № 1. С. 165–169. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28402111>
5. Хворов Г. А., Юмашев М. В. Анализ энергосберегающих технологий на основе газоохлаждающих материалов на основе воздухоохладителей на газотранспорте ПАО «Газпром» // Территория НЕФТЕГАЗ. 2016. № 9. С. 127–132. URL: <https://elibrary.ru/wwxild>
6. Makarov N. V., Makarov V. N. Additive mathematical modeling and development of high-pressure adaptable local ventilation fans // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 262. Art. 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012045
7. Макаров Н. В., Макаров В. Н., Лифанов А. В., Угольников А. В., Таугер В. М. Модификация вихревой теории круговых решеток турбомашин // ГИАБ. 2019. № 9. С. 184–194. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-184-194
8. Torshizi S. A., Benisi A., Durali M. Multilevel optimization of profile of splitter blades in the impeller of a centrifugal compressor // Scientia Iranica. 2017. No. 24. С. 707–714.
9. Fair R., Laar J. H., Nell K., Nell D., Mathews E. H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions // South African Journal of Industrial Engineering. 2021. Vol. 32. No. 3. P. 42–51. DOI: 10.7166/32-3-2616
10. Лойцанский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
11. 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. 2017. Vol. 7. No. 1. P. 5–20. DOI: 10.3390/APP7010005
12. Косарев Н. П., Макаров В. Н., Угольников А. В., Бельских А. М. Оптимизация параметров вентиляторных установок аппаратов воздушного охлаждения газа // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 8. С. 45–54. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-45-54 <http://mining-science.ru/download/2021/8/005.pdf>
13. Макаров В. Н., Макаров Н. В., Угольников Н. В., Молчанов М. В. Математическая модель активного управления циркуляционным течением в шахтных вентиляторах // ГИАБ. 2021. № 11-1. С. 239–247. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_239
14. Николаев Ю. А. Численное моделирование безударного сильного сжатия одномерных слоев политропного газа: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. М.: 2005. 23 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002945104?page=1&rotate=0&theme=white>
15. Scalise K. A., Teixeira M. B., Kocsis K. Managing heat in underground mines: the importance of incorporating the thermal flywheel effect into climatic modeling // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020. Vol. 38. P. 575–579. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5
16. Bian M., Wang W. Prediction model of vertical shaft air temperature and its application // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 384. No. 1. Art. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/384/1/012016
17. Макаров В. Н., Макаров Н. В., Молчанов М. В., Угольников А. В., Бельских А. М. Метод эффективного регулирования циркуляции в рабочих колесах вентиляторов большой быстроходности // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 4. С. 92–100. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-92-100

Поступила в редакцию 21 февраля 2023 года

**Сведения об авторах:**

**Макаров Владимир Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: [ur.intelnedra@mail.com](mailto:ur.intelnedra@mail.com); <https://orcid.org/0000-0002-3785-5569>

**Бельских Анна Михайловна** – студентка Уральского государственного горного университета. E-mail: [belskikh-2015@mail.ru](mailto:belskikh-2015@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7476-9926>

**Макаров Николай Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: [mnikolay84@mail.ru](mailto:mnikolay84@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7039-6272>

Чураков Евгений Олегович – аспирант Уральского государственного горного университета. E-mail: tschurakov.102.evgeniy@mail.ru

Дылдин Герман Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: german.dyldin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7106-4816>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-55-67

## Improving fans for air coolers through nature-like proportionality

Vladimir N. Makarov<sup>1</sup>, Anna M. Belskikh<sup>1</sup>, Nikolai V. Makarov<sup>1</sup>, Evgenii O. Churakov<sup>1</sup>, German P. Dyldin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

### Abstract

**Relevance.** The article considers the use of the profiles with distributed sources and maximum thickness shifted to the leading edge in the air cooler fan impeller blades.

**Research objective** is to develop a mathematical model and algorithm for air cooler fans improvement by means of increasing the coefficient of nature-like proportionality of impeller blade profiles.

**Methods of research.** The nature-like proportionality was used for parametric optimization of fan impeller blade profiles. The natural similarity coefficient calculation is based on Helmholtz, Cauchy, and Kelvin theorems, as well as on the hydrodynamic analogy to the geometrical and kinematic diffusion airfoil, modification of conformal mapping method, and the Zhukovsky–Chaplygin–Kutt formula applied to profiles with sources on their surface.

**Results.** A mathematical model was built demonstrating the dependence of velocity circulation and acceleration circulation of the air flow around the impeller blade profile on the parameters and location of the sources on its surface. The coefficients of nature-like proportionality of the fan impeller blades profiles have been obtained. The correlation between geometrical and kinematic diffusion airfoil has been determined during flow around the blade profile.

**Conclusions.** It has been proved that the function of source intensity distribution over the working surface beyond the maximum flow velocity area is dominant in controlling the coefficient of nature-like proportionality of a blade profile flow. Based on the developed mathematical model, the aerodynamic scheme has been developed of the blade profile with the point of maximum thickness shifted by 48% and the set function of source intensity distribution which has 1.9 times higher aerodynamic quality than a classical profile in the range of attack angles from 0° to 40°. The VU2.5–0.6 K4 fan unit has been created based on the OV-121U aerodynamic scheme for air coolers with efficiency in the operating mode of 0.75, which is 10% higher than the most advanced Hudson fans.

**Keywords:** nature-like proportionality; blade profile; fan; energy efficiency; jet flow control; velocity circulation; adaptability.

### REFERENCES

1. Vanchin A. F. Assessment methods of air cooling of gas devices operation at different options of fans actuation. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*. 2012; 5: 279–286. (In Russ.) Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20725662>
2. Abakumov A. M., Stepashkin I. P. The research of automatic control systems of natural gas air-cooling units. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki = Journal of Samara State Technical University. Ser. Technical Sciences*. 2018; 2: 92–100. (In Russ.) Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=ysdytj>
3. Kychkin A. V., Nikolaev A. V. Architecture of a cyber-physical system for the mining enterprise ventilation control based on the internet of things platform. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2021; 22 (3): 115–123 (In Russ.)
4. Ivanov A. V., Strizhenok A. V. Efficiency of dust suppression with aerosol guns–fogging machines with air-and-fluid jets. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2017; 1: 165–169. (In Russ.) Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28402111>
5. Khvorov G. A., Iumashev M. V. Analysis of energy-saving technologies for gas cooling based on air cooling units for gas transport at Gazprom PJSC. *Territoriia NEFTEGAZ = Oil and Gas Territory*. 2016; 9: 127–132. (In Russ.) Available from: <https://elibrary.ru/wwxild>

6. Makarov N. V., Makarov V. N. Additive mathematical modeling and development of high-pressure adaptable local ventilation fans. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 262: 012045. Available from: doi: 10.1088/1755-1315/262/1/012045
7. Makarov N. V., Makarov V. N., Lifanov A. V., Ugolnikov A. V., Tauger V. M. Modification of vortex theory for engineering aerodynamically stable circular gratings for turbo machines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 9: 184–194. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-184-194
8. Torshizi S. A., Benisi A., Durali M. Multilevel optimization of profile of splitter blades in the impeller of a centrifugal compressor. *Scientia Iranica*. 2017; 24: 707–714.
9. Fair R., Laar J. H., Nell K., Nell D., Mathews E. H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions. *South African Journal of Industrial Engineering*. November. 2021; 32(3): 42–51. Available from: doi: 10.7166/32-3-2616
10. Loitsanskii L. G. *Fluid mechanics*. Moscow: Drofa Publishing; 2003. (In Russ.)
11. 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*. 2017; 7(1): 5–20. Available from: doi: 10.3390/AP7010005
12. Kosarev N. P., Makarov V. N., Ugolnikov A. V., Belskikh A. M. Optimizing the parameters of gas air-cooling units fan system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2021; 8: 45–54. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-8-45-54
13. Makarov V. N., Makarov N. V., Ugolnikov N. V., Molchanov M. V. Mathematical model of active control over circulatory flow in mine fans. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 11-1: 239–247. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_239
14. Nikolaev Iu. A. *Numerical modelling of shockless high-ratio compression of one-dimensional blankets of polytropic gas: PhD in physical and mathematical sciences abstract of diss*. Moscow: 2005. (In Russ.) Available from: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002945104?page=1&rotate=0&theme=white>
15. Scalise K. A., Teixeira M. B., Kocsis K. Managing heat in underground mines: the importance of incorporating the thermal flywheel effect into climatic modeling. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2020; 38: 575–579. Available from: doi: 10.1007/s42461-020-00323-5
16. Bian M., Wang W. Prediction model of vertical shaft air temperature and its application. In: *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2019; 384(1): 012016. Available from: doi: 10.1088/1755-1315/384/1/012016
17. Makarov V. N., Makarov N. V., Molchanov M. V., Ugolnikov A. V., Belskikh A. M. Method of effective circulation control of high speed fans impellers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 4: 92–100. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-4-92-100

Received 21 February 2023

#### Information about the authors:

**Vladimir N. Makarov** – DSc (Engineering), Professor of the Department of Mining Mechanical Engineering, Ural State Mining University. Email: [ur.intelnedra@mail.com](mailto:ur.intelnedra@mail.com); <https://orcid.org/0000-0002-3785-5569>

**Anna M. Belskikh** – student, Ural State Mining University. Email: [belskikh-2015@mail.ru](mailto:belskikh-2015@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7476-9926>

**Nikolai V. Makarov** – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Mining Mechanical Engineering, Ural State Mining University. Email: [mnikolay84@mail.ru](mailto:mnikolay84@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7039-6272>

**Evgenii O. Churakov** – PhD student, Ural State Mining University. Email: [tschurakov.102.evgeniy@mail.ru](mailto:tschurakov.102.evgeniy@mail.ru)

**German P. Dyldin** – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Mining Mechanical Engineering, Ural State Mining University. Email: [German.Dyldin@yandex.ru](mailto:German.Dyldin@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7106-4816>

**Для цитирования:** Макаров В. Н., Бельских А. М., Макаров Н. В., Чураков Е. О., Дылдин Г. П. Совершенствование вентиляторов для аппаратов воздушного охлаждения на базе природоподобной соразмерности // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 4. С. 55–67. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-55-67

**For citation:** Makarov V. N., Belskikh A. M., Makarov N. V., Churakov E. O., Dyldin G. P. Improving fans for air coolers through nature-like proportionality *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 4: 55–67 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-55-67