

## Научная статья

УДК 622.23.05

DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-1-51-59

**Повышение аэродинамической нагруженности газоотсасывающих вентиляторов типа УВЦГ на основе природоподобной соразмерности для интенсификации угледобычи****Ербол Сапарбаевич Нурхожаев<sup>1</sup>, Владимир Николаевич Макаров<sup>2</sup>,  
Николай Владимирович Макаров<sup>3</sup>, Рустам Гумарович Ахметов<sup>4</sup>**<sup>1,4</sup>Акционерное общество «Костанайские минералы», г. Житигара, Республика Казахстан<sup>2,3</sup>Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия<sup>1</sup>Rus.akhmetov@mail.ru, <sup>2</sup>ur.intelnedra@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3785-5569>,<sup>3</sup>mnikolay84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7039-6272>, <sup>4</sup>info@km.kz

Классические аэродинамические схемы центробежных вентиляторов в настоящее время достигли своего теоретического предела по аэродинамической нагруженности, что не позволяет повышать энергоэффективность газа отсасывающих вентиляторов. Объект исследования – газоотсасывающие вентиляторы, предназначенные для комбинированного проветривания газообильных угольных шахт. Цель исследования – повышение аэродинамической нагруженности газоотсасывающих вентиляторов за счёт формирования течения вокруг лопаток их рабочих колёс по аналогии с обтеканием объектов природы. Задачи исследования: построить формулы критерия эффективности силового аэродинамического взаимодействия воздушного потока с профилями лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора; сформулировать метод расчёта источников управления эффективностью силового аэродинамического взаимодействия воздушного потока с профилями лопаток; провести верификацию предложенного метода расчёта аэродинамической схемы. За базу «механистического» природоподобия аэродинамического взаимодействия профилей лопаток рабочих колёс газоотсасывающих вентиляторов и воздушного потока принята доказанная гипотеза Н. Е. Жуковского, согласно которой подъёмная сила профиля определяется векторным произведением скорости воздушного потока на его циркуляцию. Получены формулы, устанавливающие зависимости между природоподобной соразмерностью интенсивности вихревого течения вокруг профилей лопаток вращающегося рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора с диффузорностью воздушного потока, интенсивностью источников на их поверхности, аэродинамическими и геометрическими характеристиками. На базе биголоморфных порообразований обтекания профилей с источниками на Римановую плоскость, теории сингулярности гомологий, гипотезы Н. Е. Жуковского построены зависимости аэродинамических параметров силового взаимодействия профилей, имеющих источники, с воздушным потоком. Спроектированный и изготовленный на базе предложенного механистического подхода к природоподобной соразмерности газоотсасывающий вентилятор УВЦГ-9П подтвердил его высокую достоверность и эффективность. Рост коэффициента аэродинамической нагруженности с 0,96 до 1,25 составил 30 %, при этом коэффициент полезного действия увеличился с 0,75 до 0,86, что превышает показатели наиболее совершенных вентиляторов английской фирмы Keith Blacman Limited типа 95M.

**Ключевые слова:** профиль, лопатка, рабочее колесо, газоотсасывающий вентилятор, источник, циркуляция скорости, циркуляции ускорения, Риманова плоскость, биголоморфное преобразование, аэродинамическая нагруженность, природоподобная соразмерность

**Для цитирования**

Нурхожаев Е. С., Макаров В. Н., Макаров Н. В., Ахметов Р. Г. Повышение аэродинамической нагруженности газоотсасывающих вентиляторов типа УВЦГ на основе природоподобной соразмерности для интенсификации угледобычи // Вестник Забайкальского государственного университета. 2025. Т. 31, № 1. С. 51–59. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-1-51-59

## Original article

**Increasing the Aerodynamic Loading of Gas-Suction Fans Based on Nature-Like Proportionality for Intensifying Coal Mining****Erbol S. Nurkhozhaev<sup>1</sup>, Vladimir N. Makarov<sup>2</sup>, Nikolay V. Makarov<sup>3</sup>, Rustam G. Akhmetov<sup>4</sup>**<sup>1,4</sup>Kostanay Minerals JSC, Zhitigara, Republic of Kazakhstan<sup>2,3</sup>Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia<sup>1</sup>Rus.akhmetov@mail.ru, <sup>2</sup>ur.intelnedra@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3785-5569>,<sup>3</sup>mnikolay84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7039-6272>, <sup>4</sup>info@km.kz

Classic aerodynamic schemes of centrifugal fans have currently reached their theoretical limit in terms of aerodynamic loading, which does not allow increasing the energy efficiency of gas suction fans. The object of the study is presented by gas suction fans, designed for combined ventilation of gas-rich coal mines. The purpose of the work has become the aerodynamic loading increasing of gas suction fans by forming a flow around the blades of their impellers by analogy with the flow around natural objects. The following tasks are solved: to construct formulas for the efficiency criterion of the force aerodynamic interaction of the air flow with the blade profiles of the impeller of the gas suction fan; to formulate a method for calculating the sources of control over the force aerodynamic interaction efficiency of the air flow with the blade profiles and to verify the proposed method for calculating the aerodynamic scheme. The proven hypothesis of N. E. Zhukovsky, according to which the lift force of an airfoil is determined by the vector product of the air flow velocity and its circulation, is adopted as the basis for the “mechanical” nature-likeness of the aerodynamic interaction of the blade profiles of a gas-suction fan working wheel and the air flow. The formulas are obtained that establish the relationships between the nature-like proportionality of the vortex flow intensity around the blade profiles of the gas-suction fan rotating working wheel with the diffuseness of the air flow, the intensity of sources on their surface, and aerodynamic and geometric characteristics. Based on biholomorphic pore formations of the flow around profiles with sources on the Riemann plane, the theory of homology singularity, and N. E. Zhukovsky's hypothesis, the dependencies of the aerodynamic parameters of the force interaction of profiles with sources with the air flow are constructed. The gas-suction fan UVCG-9P, designed and manufactured on the basis of the proposed mechanistic approach to nature-like proportionality, has confirmed its high reliability and efficiency. The growth of the aerodynamic loading coefficient from 0.96 to 1.25 constitutes 30 %, while the efficiency increased from 0.75 to 0.86 and exceeds the indicators of the most advanced fans of the English company Keith Blacman Limited type 95M.

**Keywords:** profile, blade, impeller, gas-suction fan, source, velocity circulation, acceleration circulation, Riemann plane, biholomorphic transformation, aerodynamic loading, nature-like proportionality

**For citation**

Nurkhozhaev E. S., Makarov V. N., Makarov N. V., Akhmetov R. G. Increasing the Aerodynamic Loading of Gas-Suction Fans Based on Nature-Like Proportionality for Intensifying Coal Mining // // Transbaikal State University Journal. 2025. Vol. 31, no. 1. P. 51–59. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-1-51-59

**Введение.** На предприятиях горно-металлургического комплекса Российской Федерации с 1998 г. широкое применение нашли газоотсасывающие вентиляторы типа УВЦГ, позволившие существенно увеличить нагрузку на очистной забой при обеспечении гарантированной метанобезопасности [1; 8; 10].

Применение комбинированной схемы проветривания с использованием газоотсасывающих вентиляторов типа УВЦГ за 20 лет позволило повысить нагрузку на очистной забой газообильных угольных шахт с 5–6 до 30–35 тыс. т в сутки. Однако увеличение глубины выработок угольных шахт и интенсификация выделения метана требуют дальнейшего увеличения давления газоотсасывающих вентиляторов, ограниченного резким падением их экономичности, что обуславливает актуальность поиска новых путей повышения

аэродинамической нагруженности при сохранении экономичности [4; 6; 9].

**Актуальность.** Низкая экономичность газоотсасывающих вентиляторов обусловлена недостаточной аэродинамической нагруженностью профилей лопаток рабочих колёс, на базе которых они разработаны. Аэродинамическая нагруженность центробежных вентиляторов достигла предела, что обуславливает необходимость поиска новых подходов к её повышению с учетом требования высокой экономичности [3; 7; 14].

**Объект** – газоотсасывающие вентиляторы, предназначенные для дегазации очистных, проходческих забоев и обрушенных выработок газообильных угольных шахт при комбинированном способе их проветривания.

**Предмет** – совокупность процессов взаимодействия профилей лопаток рабочих ко-

лёт с воздушным потоком в их аналогии с обтеканием объектов природы.

**Цель** – повышение аэродинамической нагруженности газоотсасывающих вентиляторов за счёт целенаправленного управления эффективностью силового аэродинамического взаимодействия воздушного потока с профилями лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора вследствие формирования течения вокруг них по аналогии с обтеканием объектов природы, т. е. на основе природоподобной соразмерности.

**Задачи:**

1) на базе исследований физической картины обтекания объектов природы, в частности аэродинамического взаимодействия крыла птицы с воздушным потоком, в результате которого возникают подъёмная сила и инерция её движения, определить значимые параметры, характеризующие эффективность преобразования механической, точнее мышечной, энергии, обеспечивающей взмах крыла, в потенциальную и кинетическую энергию подъёмной силы крыла и инерции движения птицы, иными словами, критерии эффективности процесса преобразования энергии;

2) с учётом природоподобной соразмерности построить расчётные формулы критерия эффективности силового аэродинамического взаимодействия воздушного потока с профилями лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора за счёт формирования течения вокруг них по аналогии с обтеканием объектов природы, т. е. на основе природоподобной соразмерности;

3) построить математическую модель зависимости критерия эффективности силового аэродинамического взаимодействия воздушного потока с профилями лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора;

4) сформулировать метод расчёта источников управления эффективностью силового аэродинамического взаимодействия воздушного потока с профилями лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора на базе природоподобной соразмерности;

5) провести верификацию предложенного метода расчёта аэродинамической схемы профилей с источниками на базе результатов испытаний газоотсасывающего вентилятора, изготовленного на основе природоподобной соразмерности.

**Методология и методы.** Методология исследования базируется на комплексном подходе к анализу аэродинамических процессов взаимодействия воздушного потока с вращающимися профилями лопаток рабоче-

го колеса газоотсасывающего вентилятора и с «машущим крылом» птицы в полёте, изучении механизма обеспечения плавности, безотрывного обтекания крыла в широком диапазоне изменения его формы и траектории полёта птицы. В основу методов исследования положены фундаментальные закономерности течения сплошной среды с учётом неразрывности, взаимосвязи, скорости и ускорения воздушного потока с его диффузностью на основе аэродинамической аналогии.

**Разработанность темы.** В научной литературе к вопросу природоподобной соразмерности в большинстве статей подходят с позиции комплексной конвергентности на базе нано-, био-, информационных и когнитивных технологий для создания природоподобных техногенных объектов. Интеграция явлений природы в объекты, создаваемые человеком, позволяет существенно повышать их энергоэффективность в случае использования природоподобной соразмерности.

В статье принят исключительно «механистический» подход к исследованию природоподобной соразмерности, рассматриваемый как первоначальный, но очень значимый этап создания природоподобных техногенных объектов, отличающихся максимальной адаптивностью к нейронным системам. Имеющиеся по данному направлению исследования направлены в основном на поиск путей повышения эффективности и не коррелируют с аэродинамической нагруженностью вентиляторов [5; 7].

**Результаты.** За базу «механистического» природоподобия аэродинамического взаимодействия профилей лопаток рабочих колёс газоотсасывающих вентиляторов и воздушного потока принята научная гипотеза Н. Е. Жуковского, согласно которой в точке схода потока воздуха с профиля лопатки его скорость должна быть равна нулю<sup>1</sup>. Однако при изменении траектории полёта, точнее аэродинамической нагруженности крыльев, природа дала птицам возможность изменять форму, размер, положение отдельных частей крыльев. Главное, чтобы при всей совокупности изменений в процессе силового взаимодействия машущим крылом обеспечивалась такая его геометрия, при которой воздушный поток, изменяя свои параметры, в частности скорость, оставался неразрывным, плавно сходил с выходной кромки каждого пера, являющегося частью крыла птицы в соответствии с гипотезой Н. Е. Жуковского [11; 13].

<sup>1</sup> Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: учебник. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

В соответствии с принципом аэродинамической аналогии изменение формы профиля природного объекта, в данном случае перьев либо крыла птицы в целом, соответствует формированию диффузорности, иными словами, замедлению воздушного потока, обтекающего их. При этом сложные изменения геометрии и взаимного расположения перьев крыла обеспечивают такие параметры скорости и ускорения обтекающего воздушного потока, при которых достигаются требуемое силовое взаимодействие, т. е. подъёмная сила, и его плавный сход с выходных кромок перьев, что исключает потери энергии на отрывное вихреобразование. Указанное действие идентично действию соответствующим образом расположенных на жёстком неизменяющем форму профиле лопатки рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора стоков либо источников с интенсивностью, которая коррелирует с геометрией диффузора, образуемого перьями либо крылом в целом. Таким образом, изменение геометрии обтекаемого тела с позиции силового взаимодействия за счёт аэродинамики воздушного потока аналогично действию источников либо стоков дополнительного воздушного потока, поскольку обеспечивает те же самые значения скоростей и ускорений потока при обеспечении плавного схода с задней выходной кромки [7; 13].

Формулу, связывающую диффузорность потока воздуха в газоотсасывающем вентиляторе, аэродинамические и геометрические характеристики профиля лопаток его рабочего колеса и воздушного потока, а также интенсивность источника на поверхности лопаток, получим в виде:

$$D = 1 - \frac{\partial(\bar{V} - \bar{q}(\bar{x}))}{\partial \bar{x}} = 1 + \frac{\partial \bar{V}(\bar{x})}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{q}(\bar{x})}{\partial \bar{x}}, \quad (1.1)$$

где  $\bar{V} = \frac{V}{u}$  – приведённая скорость воздуха на профиле;

$u$  – скорость на конце профиля, м/с;

$V$  – скорость воздуха на профиле, м/с;

$\bar{q}(\bar{x}) = q(\bar{x}) / Q$  – приведённый расход источника на поверхности профиля;

$Q$  – производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с;

$\bar{q}(\bar{x})$  – интенсивность (расход) источника на поверхности профиля, м<sup>3</sup>/с;

$\bar{x} = x / b$ ,  $\bar{y} = y / b$  – приведённые координаты профиля;

$b$  – длина хорды профиля, м;

$x$ ,  $y$  – координаты профиля, м.

С учётом сказанного выражение для коэффициента эффективности силового аэродинамического взаимодействия воздушного потока и профилей лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора с учетом сингулярности, т. е. точки на профиле лопатки, где диффузорность равна нулю, получим в виде:

$$K^{\gamma}(\bar{x}_q, \bar{q}) = \int_{\bar{x}_m}^{\bar{x}_{3KT}} \frac{\gamma(\bar{x})}{\gamma_a(\bar{x})} d\bar{x} = \int_{\bar{x}_m}^{\bar{x}_{3KT}} \left( \frac{d\bar{V}}{d\bar{x}} \right)^{-1} d\bar{x}, \quad (1.2)$$

где  $\bar{x}_m$ ,  $\bar{x}_{3KT}$ ,  $\bar{x}_q$  – приведённые координаты максимальной толщины профиля, задней критической точки профиля и источника дополнительного воздушного потока;

$\gamma(\bar{x})$ ,  $\gamma_a(\bar{x})$  – коэффициенты циркуляции скорости и ускорения потока воздуха.

Метод биголоморфных преобразований позволяет построить дополнительное слагаемое в уравнении Н. Е. Жуковского, определяющее циркуляцию вокруг профиля, т. е. силовое аэродинамическое взаимодействие профиля и воздушного потока в условиях природоподобной соразмерности [11; 13; 16].

С учётом биголоморфного преобразования (рис. 1б) формулу для определения аэродинамических параметров воздушного потока, обтекающего природоподобный профиль в Римановой плоскости, получим в виде:

$$V(\theta) = -4V_{\infty} e^{-\left(\theta_{\infty} - \frac{\theta_0 + \theta_q}{2} + \theta\right)} \times \frac{\sin(\theta - \theta_0) \sin(\theta - \theta_{kq})}{\sin(\theta - \theta_q)} \sin \theta, \quad (1.3)$$

где  $V_{\infty}$  – скорости набегающего потока с углом атаки  $\alpha$ , м/с;

$\theta_{\infty}$  – угол вектора скорости на бесконечности в областях  $D_z$  и  $D_{\lambda}$  с осями  $O_z x$  и  $O_{\lambda} \varphi$ , рад;

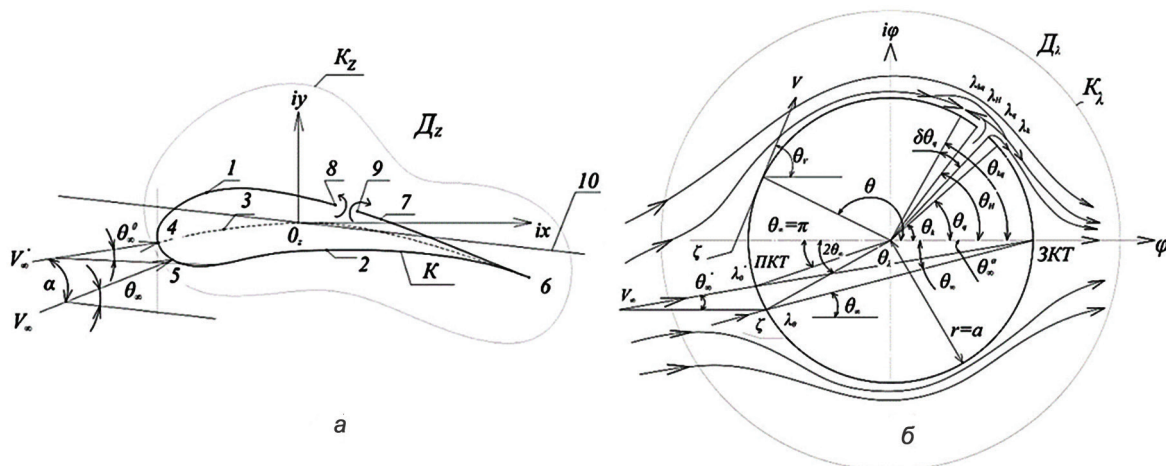
$\theta_0 = \pi + 2\theta_{\infty} + \theta_q - \theta_{kq}$  – полярный угол положения передней критической точки профиля лопатки на цилиндре в Римановой плоскости  $D_{\lambda}$  ( $\theta_{пкт}$ ) с учётом смещения от действия источника  $q$ , рад;

$\theta_q$  – полярный угол положения точки центра канала  $\lambda_q$  источника  $q$  на Римановой плоскости  $D_{\lambda}$ ;

$\theta$  – текущий угол положения точек  $\lambda_q = re^{i\theta}$  на цилиндре в Римановой плоскости  $D_{\lambda}$ , рад;

$\theta_{kq}$  – полярный угол положения точки полного торможения потока на цилиндре от действия источника  $q$  ( $\lambda_{kq}$ ) в Римановой плоскости  $D_{\lambda}$ .





**Рис. 1.** Природоподобный профиль (а) и его биголоморфное преобразование в Римановой плоскости  $D_l$  (б): 1 – рабочая поверхность; 2 – тыльная поверхность; 3 – средняя линия профиля; 4, 5 – передняя критическая точка профиля лопатки при скорости набегающего потока с нулевым углом атаки  $V_\infty^0$  и с углом атаки  $\alpha V_\infty$ ; 6 – задняя критическая точка; 7 – точка обрыва потока; 8, 9 – границы источника (аэродинамического канала); 10 – линия безциркуляционного обтекания профиля;  $D_z$  – физическая плоскость обтекания профиля;  $K_z$  – замкнутый контур, охватывающий контур  $K$  профиля в области  $D_z$  /

**Fig. 1.** The nature-like profile (a) and its biholomorphic transformation in the Riemannian plane  $D_l$  (б): 1 – working surface; 2 – rear surface; 3 – middle line of the profile; 4, 5 – front critical point of the blade profile at the speed of the incoming flow with zero angle of attack  $V_\infty^0$  and with an angle of attack  $\alpha V_\infty$ ; 6 – posterior critical point; 7 – point of separation of the flow; 8, 9 – boundaries of the source (aerodynamic channel); 10 – line of uncirculating flow around the profile;  $D_z$  – physical plane of the flow around the profile;  $K_z$  – closed contour covering the contour of the profile  $K$  in the area  $D_z$

Для расчёта величины силового аэродинамического взаимодействия, определяемого циркуляцией воздушного потока вокруг круга в Римановой плоскости  $D_l$ , воспользуемся интегралом Коши и теоремой Кельвина о постоянстве циркуляции по замкнутому контуру [2; 12; 13]:

$$\gamma = 2\pi i V_\infty e^{-i\theta_\infty} (e^{-i\theta_q} - e^{-i\theta_0} + e^{-i\theta_{kq}}). \quad (1.4)$$

После соответствующих преобразований в тригонометрической форме получим:

$$\begin{aligned} \gamma &= -2\pi V_\infty \alpha [\sin(\theta_\infty - \theta_0) + \sin(\theta_\infty - \theta_{kq}) - \\ &\quad - \sin(\theta_\infty - \theta_q) + \sin \theta_\infty]; \\ q &= 2\pi V_\infty \alpha [\cos(\theta_\infty - \theta_{kq}) - \cos(\theta_\infty - \theta_0) - \\ &\quad - \cos(\theta_\infty - \theta_q) + \cos \theta_\infty]. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Принимая в формуле (1.5)  $\theta_q = \theta_{kq} = \theta_0 = 0$ , получим уравнение для циркуляции  $\gamma_k$  при классическом обтекании круга без источника на его поверхности в Римановой плоскости  $D_l$ , т. е. уравнение Н. Е. Жуковского:

$$\gamma = \gamma_k = -4\pi V_\infty \sin(\theta_\infty); \quad q = 0. \quad (1.6)$$

Таким образом, дополнительное слагаемое в уравнении Н. Е. Жуковского (1.6), соответствующее природоподобному обтеканию профиля на Римановой плоскости и определяющее рост циркуляции, т. е. силового аэродинамического взаимодействия за счёт источника дополнительного воздушного потока на его поверхности при сохранении

плавного схода потока с выходной кромки, рассчитывается по формуле:

$$\gamma_\alpha = 2\pi V_\infty \alpha [\sin(\theta_\infty - \theta_q) + \sin(\theta_\infty - \theta_{kq})]. \quad (1.7)$$

Для установления связи коэффициента эффективности силового аэродинамического взаимодействия воздушного потока и профилей лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора (1.2) с их параметрами и источником дополнительного воздуха получим циркуляцию ускорения потока, обтекающего круг в Римановой плоскости  $D_l$ , обусловленную действием источника, в виде:

$$\gamma_\alpha(\lambda_q) = 2\pi V_\infty \alpha [\cos(\theta_\infty - \theta_q) + \cos(\theta_\infty - \theta_{kq})]. \quad (1.8)$$

С учётом формул (1.2), (1.7), (1.8) коэффициент эффективности силового аэродинамического взаимодействия воздушного потока с профилями лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора от действия источника получим в виде:

$$K^*(\lambda_q) = \frac{\sin(\theta_\infty - \theta_{kq}) - \sin(\theta_\infty - \theta_q)}{\cos(\theta_\infty - \theta_{kq}) - \cos(\theta_\infty - \theta_q)}. \quad (1.9)$$

При  $\theta_\infty = \text{const}$ , т. е. при фиксированных начальных аэродинамических параметрах воздушного потока рост эффективности силового взаимодействия профиля с ним происходит за счёт роста интенсивности источника дополнительного воздуха, что является аэродинамическим аналогом обтекания объ-

ектов природы, в частности крыла птицы, у которого происходит изменение его формы, т. е. кривизны.

Таким образом, при изменении начальных условий на Римановой плоскости  $D_\lambda$  регулированием интенсивности источников на поверхности круга от  $\theta = \theta_0$  до  $\theta = \theta_{\text{зкт}}$  обеспечивается требуемая эффективность силового аэродинамического взаимодействия природоподобного профиля с воздушным потоком при обеспечении нулевой его скорости в точке схода с профиля.

Аэродинамические параметры силового взаимодействия воздушного потока и профилей лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора с источником на их поверхности и, как результат, коэффициент аэродинамической нагруженности могут быть получены с учётом принципа суперпозиции,

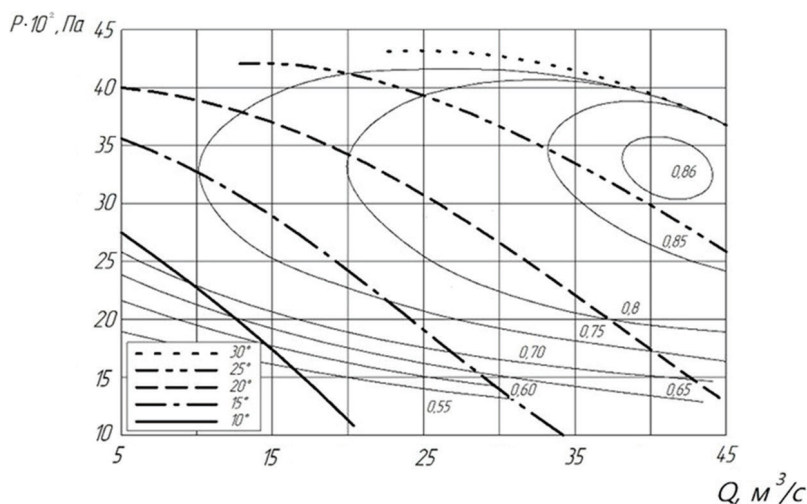
аэродинамической аналогии в виде параметрической зависимости от  $\lambda$  [13; 15].

Для верификации уточнённой формулы Н. Е. Жуковского по предложенной методике спроектирована аэродинамическая схема Ц125–18П с источником на тыльной и стоком на рабочей поверхностях хвостовой части профилей лопаток, на базе которой изготовлен и прошёл испытания опытно-промышленный образец газоотсасывающего вентилятора УВЦГ-9П, характеристика которого представлена на рис. 2.

Рост коэффициента давления, т. е. аэродинамической нагруженности газоотсасывающего вентилятора УВЦГ-9П, составил не менее 30 % по отношению к выпускаемому в настоящее время вентилятору УВЦГ-9 при повышении коэффициента полезного действия с 0,75 до 0,86.



а



б

**Рис. 2.** Вид на лопатку рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора Ц125–18П с источником на её тыльной и стоком на рабочей поверхностях (а), аэродинамическая характеристика вентилятора (б)

**Fig. 2.** The view of the blade of the impeller of the gas-suction fan Ts125–18P with a source on its rear and a drain on the working surfaces (а), aerodynamic characteristics of the fan (б)

**Выводы.** Подтверждена актуальность использования природоподобной соразмерности для повышения аэродинамической нагруженности газоотсасывающих вентиляторов в целях интенсификации угледобычи при комбинированном способе проветривания газообильных шахт.

Получены формулы, устанавливающие зависимости между природоподобной соразмерностью интенсивности вихревого течения

вокруг профилей лопаток вращающегося рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора с диффузорностью воздушного потока, интенсивностью источников на их поверхности, аэродинамическими и геометрическими характеристиками.

На базе биголоморфных преобразований обтекания профилей с источниками на Римановую плоскость, теории сингулярности гомологий, гипотезы Н. Е. Жуковского

построены зависимости аэродинамических параметров силового взаимодействия профилей, имеющих источники, с воздушным потоком.

Определено аналитическое выражение дополнительного слагаемого в формуле Н. Е. Жуковского, отражающего природоподобную аналогию обтекания профиля с источниками и объектов природы. Получены формулы для расчёта параметров источника на профиле, обеспечивающих рост коэффициента эффективности его силового аэродинамического взаимодействия с воздушным потоком за счёт формирования течения во-

круг них по аналогии с обтеканием объектов природы.

Спроектированный и изготовленный на базе предложенного механистического подхода к природоподобной соразмерности газотасывающий вентилятор УВЦГ-9П подтвердил его высокую достоверность и эффективность. Рост коэффициента аэродинамической нагруженности с 0,96 до 1,25 составил 30 %, при этом коэффициент полезного действия увеличился с 0,75 до 0,86, что превышает показатели наиболее совершенных на настоящее время вентиляторов английской фирмы Keith Blacman Limited типа 95M.

### Список литературы

1. Батухтин А. Г., Батухтин С. Г., Якубович А. И., Кузнецова Н. С. Анализ эффективности теплосъёма поверхностей нагрева // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 4. С. 65–72. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-4-65-72
2. Бойков А. В., Савельев Р. В., Пайор В. А. Применение численного моделирования в горно-металлургической области // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ». СПб.: Нацразвитие, 2019. С. 31–34.
3. Босиков И. И., Ключев Р. В., Хетагуров В. Н., Ажмухамедов И. М. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13, № 1. С. 77–83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83
4. Истратова К. Какие перспективы у угля? // Добывающая промышленность. 2021. № 5. С. 22–24.
5. Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Яцишина Е. Б. Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 455–465. DOI: 10/31857/S0869-5873895455-465
6. Копачев В. Ф. Сравнительные аэродинамические параметры шахтных осерадиальных вентиляторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11-1. С. 219–228. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_219
7. Макаров В. Н., Макаров Н. В., Угольников А. В., Чураков Е. О., Молчанов М. В. Математическая модель управления локальной диффузорностью адаптивных шахтных турбомашин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11-1. С. 248–257. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_248
8. Малашкина В. А. Исследование возможностей повышения эффективности подземной дегазации угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 9. С. 131–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-131-137
9. Малашкина В. А. Направления повышения эффективности дегазации для улучшения условий труда шахтёров угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 7. С. 69–75.
10. Малашкина В. А. Определение режимов работы дегазационных установок угольных шахт с участками подземных газопроводов из композитных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. Спец. вып. 19.
11. Шаров Н. А., Дудаев Р. Р., Кришук Д. И., Лискова М. Ю. Методы пылеподавления на угольных разрезах Крайнего Севера // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2019. Т. 19, № 2. С. 184–200. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.2.8
12. 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. Vol. 32, no. 3. P. 42–51. DOI: 10.7166/32-3-2616
13. Kornilov G., Gazizova O., Bunin A., Bulanov M., Karyakin A. L. Improving the quality of voltage in the conditions of the oxygen-converter shop of metallurgical production // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, ICOECS. 2019. Art. 8949928. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949928
14. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing: materials of the ICIEAM. New York, 2020. Art. 9111995. 5 p.
15. Makarov N. V., Makarov V. N. Additive mathematical modeling and development of high-pressure adaptable local ventilation fans // Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 262. Art. 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012045

16. Velikanov V. S., Dyorina N. V., Suslov N. M., Luntsova A. I., Rabina E. I. Automation of design for dynamic loading at the designing stage of mining machinery // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399. Art. 033010. P. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/3/033010

## References

1. Batukhtin AG, Batukhtin SG, Yakubovich AI, Kuznetsova NS. Analysis of heat removal efficiency of heating surfaces. *Transbaikal State University Journal*. 2023;29(4):65–72. (In Russian).
2. Boikov AV, Savelev RV, Payor VA. Computer simulation in mining industry. In: Collection of selected articles based on materials from scientific conferences of the State Research Institute «NATSRZAVITIE». Saint Petersburg: Natsrazvitie; 2019. Pp. 31–34. (In Russian).
3. Bosikov II, Klyuev RV, Khetagurov VN, Azhmukhamedov IM. Development of methods and management tools aerogas dynamics processes at mining sites. *Sustainable development of mountain territories*. 2021;13(1):77–83. (In Russian).
4. Istratova K. What are the prospects for coal? *Mining industry*. 2021;(5):22–24. (In Russian).
5. Kovalchuk MV, Naraikin OS, Yatsishina EB. Nature-like technologies: new opportunities and new challenges. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019;89(5):455–465. (In Russian).
6. Kopachev VF. Aerodynamic performance of axial-and-radial mine fans. *Mining informational and analytical bulletin*. 2021;(11-1):219–228. (In Russian).
7. Makarov VN, Makarov NV, Ugolnikov AV, Churakov EO, Molchanov MV. Mathematical model of local diffusion control in adaptable mine turbomachines. *Mining informational and analytical bulletin*. 2021;(11-1):248–257. (In Russian).
8. Malashkina VA. Efficiency boosting feature of intensification of coal mine in degasification. *Mining informational and analytical bulletin*. 2019;9:131–137. (In Russian).
9. Malashkina VA. Coal mine degasification efficiency enhancement to improve working conditions of miners. *Mining informational and analytical bulletin*. 2018;7:69–75. (In Russian).
10. Malashkina VA. The definition of the modes of degassing plants of coal mines with sections of underground pipelines made of composite materials. *Mining informational and analytical bulletin*. 2018;5(19):3–11. (In Russian).
11. Sharov NA, Dudayev RR, Krishchuk DI, Liskova MYu. Methods of dust suppression at open-pits coal mines of Extreme North. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining*. 2019;19(2):184–200. (In Russian).
12. Fair R, Laar JN, Nell K, Nell D, Mathews EH. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions. *The South African Journal of Industrial Engineering*. 2021;32(2):45–51. (In Russian).
13. Kornilov G, Gazizova O, Bunin A., Bulanov M, Karyakin AL. Improving the quality of voltage in the conditions of the oxygen-converter shop of metallurgical production. In: 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, ICOECS. 2019. Art. 8949928.
14. Kychkin A, Nikolaev A. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin In: 2020 International Conference on Industrial Engineering. Applications and Manufacturing: materials of the ICIEAM. New York; 2020. Art. 9111995. 5 p.
15. Makarov NV, Makarov VN. Additive mathematical modeling and development of high-pressure adaptable local ventilation fans. In: IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2019.
16. Velikanov VS, Dyorina NV, Suslov NM, Luntsova AI, Rabina EI. Automation of design for dynamic loading at the designing stage of mining machinery. *Journal of physics Conference series*. 2019;1399(3):033010.

## Информация об авторах

Нурхожаев Ербол Сапарбаевич, председатель правления, АО «Костанайские минералы», г. Житигара, Республика Казахстан; Rus.akhmetov@mail.ru. Область научных интересов: совершенствование технологии сушки и сепарации рудных и нерудных материалов, повышение экологической эффективности теплообменного оборудования.

Макаров Владимир Николаевич, д-р техн. наук, доцент кафедры горной механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия; ur.intelnedra@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3785-5569>. Область научных интересов: исследование конвертерного подхода к аэродинамическим процессам добычи, обогащения и переработки рудных и нерудных материалов, способов и путей повышения эффективности турбомашин и теплообменного оборудования.

Макаров Николай Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры горной механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия; mnikolay84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7039-6272>. Область научных интересов: исследования механизмов взаимодействия воздушного потока и рабочих органов турбомашин, поиск путей повышения эффективности аэродинамической нагруженности вентиляторов для шахт рудников и охлаждения компримированного газа.



Ахметов Рустам Гумарович – главный механик, АО «Костанайские минералы», г. Житигара, Республика Казахстан; info@km.kz. Область научных интересов: совершенствование конструкции и аэродинамики газоотсасывающих вентиляторов для шахт и рудников.

#### **Information about the authors**

Nurkhozhaev Erbol S., chairman of the Management Board, Kostanay Minerals JSC, Zhitigara, Republic of Kazakhstan, Zhitigara, Republic of Kazakhstan; Rus.akhmetov@mail.ru. Research interests: technology improvement of ore and non-metallic materials drying and separation, increase of heat and mass transfer equipment environmental efficiency.

Makarov Vladimir N., doctor of engineering sciences, associate professor, Rock Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia; ur.intelnedra@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3785-5569>. Research interests: technology improvement of ore and non-metallic materials drying and separation, increase of heat and mass transfer equipment environmental efficiency.

Makarov Nikolay V., candidate of engineering sciences, associate professor, Rock Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia; mnikolay84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7039-6272>; Research interests: investigation of the converter approach to the aerodynamic processes of mining, enrichment and processing of ore and non-metallic materials, methods and ways to increase the turbomachines and heat and mass transfer equipment efficiency.

Akhmetov Rustam G., chief mechanic, Kostanay Minerals JSC, Zhitigara, Republic of Kazakhstan, info@km.kz; Research interests: design and aerodynamics improvement of gas extraction fans for mines and mines.

#### **Вклад авторов в статью**

Нурхожаев Е. С. – разработка концепции статьи, поиск источников.

Макаров В. Н. – генерация идеи исследования, описание теоретической и эмпирической частей исследования, произведение расчётов.

Макаров Н. В. – постановка задачи исследования, анализ результатов исследования.

Ахметов Р. Г. – выполнение работы по систематизации материала, подготовке данных, написание текста статьи.

#### **Authors' contributions to the article**

Nurkhozhaev E. S. – development of the article concept, search for sources.

Makarov V. N. – generating research ideas, description of the theoretical and empirical parts of the research, performing calculations.

Makarov N. V. – formulation of the research problem, analysis of the research results.

Akhmetov R. G. – performing work on systematizing the material, preparing data, writing the text of the article.

*Поступила в редакцию 11.09.2024; одобрена после рецензирования 10.02.2025; принята к публикации 17.02.2025.*

*Received 2024, September 11; approved after review 2025, February 10; accepted for publication 2025, February 17.*