

УТОЧНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ Н.Е. ЖУКОВСКОГО ОБТЕКАНИЯ РЕШЁТКИ ПРИРОДОПОДОБНЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Макаров Н.В.

ООО «Вентиляция Экология Безопасность», Екатеринбург

Ключевые слова: камфорное отображение, задняя критическая точка, комплексный потенциал, Риманова плоскость, теория Н.Е. Жуковского, циркуляция, сопряжённая скорость.

Аннотация. Требование снижения себестоимости валового внутреннего продукта РФ, повышения энергоэффективности предприятий горно-металлургического и нефтегазового комплекса актуализирует задачу разработки новых теоретических подходов к проектированию турбомашин, расходы на эксплуатацию которых составляют существенную долю в структуре затрат производственной себестоимости. Установлено, что эффективность обтекания природных объектов достигается не только за счёт изменения их формы, в частности, изменения формы крыла птицы, но и за счёт изменения их проницаемости. Для построения математической модели предложен комплексный потенциал потока по замкнутому контуру с перетеканием части потока из области повышенного давления в область пониженного давления, в целях управления результирующей подъёмной силой. На базе построенной математической модели получено уравнение для расчета циркуляции потока вокруг прямой решетки профилей Н.Е. Жуковского. С учетом уравнения Бернулли результирующая подъёмная сила, обусловленная проницаемостью, равна произведению плотности потока на его расход через сток, источник и на скорость набегающего потока. Испытания опытно-промышленного образца вентиляторной установки ВУ 2,5-1,8К4, рабочее колесо которой изготовлено с использованием лопаток с проницаемым контуром, рассчитанных по предложенной математической модели, подтвердили повышение КПД на 8%, давления на 20% по отношению к показателям наиболее совершенных установок фирмы ГЕА (Германия).

REFINEMENT OF N.E. ZHUKOVSKY MATHEMATICAL MODEL OF FLOW AROUND A GRATING OF NATURE-LIKE PROFILES FOR THE CREATION OF ENERGY-EFFICIENT FANS

Makarov N.V.

Ventilation Ecology Safety LLC, Yekaterinburg

Keywords: camphor mapping, rear critical point, complex potential, Riemann plane, theory of N.E. Zhukovsky, circulation, conjugate velocity.

Abstract. The requirement to reduce the cost of the gross domestic product of the Russian Federation and to increase the energy efficiency of enterprises in the mining, metallurgical, and oil and gas complex makes it necessary to develop new theoretical approaches to the design of turbomachines, the operating costs of which account for a significant share of the production cost structure. It has been established that the efficiency of flow around natural objects is achieved not only by changing their shape, such as the shape of a bird's wing, but also by changing their permeability. To construct a mathematical model, a complex flow potential is proposed along a closed contour with the flow flowing from an area of high pressure to an area of low pressure in order to control the resulting lift force. Based on the constructed mathematical model, an equation was obtained for calculating the flow circulation around the straight grid of N.E. Zhukovsky profiles. Taking into account the Bernoulli equation, the resulting lift force due to permeability is equal to the product of the flow density by its flow rate through the drain, source, and the speed of the incoming flow. Tests of a pilot-scale model of the VU 2.5-1.8K4 fan unit, whose impeller is made using blades with a permeable contour calculated according to the proposed mathematical model, confirmed an increase in efficiency by 8% and pressure by 20% compared to the most advanced units from GEA (Germany).

Введение

Взаимодействие природных объектов с окружающей средой показывает, что их безотрывное обтекание при изменении внешних условий достигается не только за счёт изменения формы, в частности изменения профиля крыла птицы, но и за счёт изменения его проницаемости [1]. Широкое применение для построения математических моделей,

описывающих обтекание природных объектов, аэродинамических процессов в турбомашинах нашла теория функций комплексного переменного. В статье для построения математической модели обтекания тел с проницаемой поверхностью предложен вид комплексного потенциала потока по замкнутому контуру с перетеканием части потока из области повышенного давления в область пониженного давления, в целях управления результирующей подъёмной силой и соответственно аэродинамической нагруженностью, экономичностью турбомашин.

Использование комплексного потенциала простейших потоков, обтекающих внешность круга во вспомогательной плоскости с помощью преобразующих функций конформного отображения на него крыловых профилей Жуковского – Чаплыгина в физической плоскости позволяет получить аэродинамические параметры прямых и радиальных решёток, как гидродинамических аналогов турбомашин осевого и радиального типов [2, 3].

В соответствии с теорией Н. Е. Жуковского подъёмная сила крылового профиля эквивалента действию набегающего потока на присоединённый вихрь, интенсивность которого равна циркуляции потока по замкнутому контуру, окружающему обтекаемый профиль. Математическая модель Н. Е. Жуковского построена на условии непроницаемости крылового профиля, который математически заменен на присоединенный вихрь, интенсивность которого зависит от формы профиля и угла набегающего потока. Это условие накладывает определённые ограничения на аэродинамическую нагруженность и адаптивность круговых и плоских решёток профилей и, как следствие, экономичность турбомашин [4].

Объект и предмет исследований

Вентиляторные установки для аппаратов воздушного охлаждения компрессорной станции магистральной газопроводов, а также энергоёмкие вентиляторы, главным образом используемые для проветривания шахт рудников, туннелей и аэродинамические процессы, взаимодействия лопаток рабочих колёс турбомашин с проницаемой поверхностью.

Цель исследований – повышение аэродинамического давления, развиваемого вентиляторами, их энергоэффективности и адаптивности за счёт управления проницаемостью лопаток рабочих колёс.

Методы исследований базируются на комплексном применении математического аппарата теории комплексных чисел, конформных преобразований, гипотезы Жуковского–Чаплыгина, природоподобной соразмерности. Достоверность предложенной математической модели базируется на верификации по средствам испытаний опытно-промышленных образцов и статистической обработки их результатов.

Математическое моделирование

Для построения математической модели, описывающей обтекание природных объектов, в данной статье предложен вид комплексного потенциала потока, обтекающего замкнутый контур с возможностью перетекания части потока из области повышенного давления в область пониженного давления, в целях управления результирующей подъёмной силой за счёт перераспределения расхода потока. Проведены исследования зависимости аэродинамических параметров потока, обтекающего замкнутый контур от его проницаемости, и получены уравнения для расчёта дополнительной циркуляции, т.е. давления развиваемого турбомашинной за счёт указываемого фактора. Особенности исследования заключаются в том, что в данном случае изменение скорости потока, приводящее в соответствии с уравнением Бернулли к изменению давления, и как результат подъёмной силы крылового профиля, происходит за счёт перераспределения расхода воздуха между рабочей и тыльной поверхностями, что в условиях неразрывности потока приводит к изменению скорости и, как результат, циркуляции вокруг профиля [5, 6].

В теории Н.Е. Жуковского в качестве базового комплексного потенциала циркуляционного обтекания круга радиусом r с непроницаемым контуром принят комплексный потенциал в виде:

$$P(\chi) = |V_\infty| \left(\chi + \frac{r^2}{\chi} \right) + \frac{\gamma_i}{\chi} \ln \chi, \quad (1)$$

где $P(\chi)$ – комплексный потенциал циркуляционного обтекания круга радиусом r , удовлетворяющий условию Коши – Римана; χ – комплексная переменная $\chi = \varphi + i\psi$; γ – циркуляция скорости по замкнутому контуру круга радиуса r , определяемая в соответствии с гипотезой Жуковского – Чаплыгина – Кутта; φ, ψ – действительная и мнимая координаты на вспомогательной плоскости течения $\varphi\psi$ (рис. 1).

В классической теории обтекание тел потоком с использованием теории функций комплексного переменного при расчёте аэродинамических параметров течения используется условие Дирихле – Неймана непроницаемости тел. При этом само тело заменяется присоединённым устойчивым вихрем, взаимодействующим с набегающим потоком, величина которого определяется согласно гипотезе Жуковского – Чаплыгина – Кутта о сходе потока с задней кромки обтекаемого тела, называемой задней критической точкой (ЗКТ) [7].

Исследование обтекания природных объектов в частности «крыла птицы» показывает, что эффективность их взаимодействия с набегающим потоком в значительной степени определяется двумя факторами, обеспечивающими плавное безотрывное обтекание с целью устранения отрывного вихреобразования, т.е. потери энергии при изменении результирующей подъёмной силы:

- возможность изменения формы профиля;
- способность управлять проницаемостью поверхности крыла для обеспечения целенаправленного перетекания части набегающего потока.

Дополнительную результирующую подъёмную силу, т.е. дополнительную циркуляцию потока в физическом процессе перетекания части набегающего потока за счёт проницаемости математически можно смоделировать с использованием теории функции комплексного переменного. Для этого достаточно уточнить комплексный потенциал потока обтекающего круг радиуса r на вспомогательной Римановой плоскости за счёт изменения мнимой составляющей комплексного потенциала течения путём наложения дополнительно диполя, включающего источник и сток с выходом их на поверхность круга и расположенных по мнимой оси координат, графически представленного на рисунке 1. Дополнительная результирующая сила давления в данном случае будет создаваться за счёт перераспределения набегающего потока по мнимой оси координат, что приведёт к изменению скорости потока симметрично действительной оси координат, т.е. возникновению перепада давления согласно уравнению Бернулли с вектором силы параллельным мнимой оси координат, т.е. перпендикулярной действительной оси [8, 9].

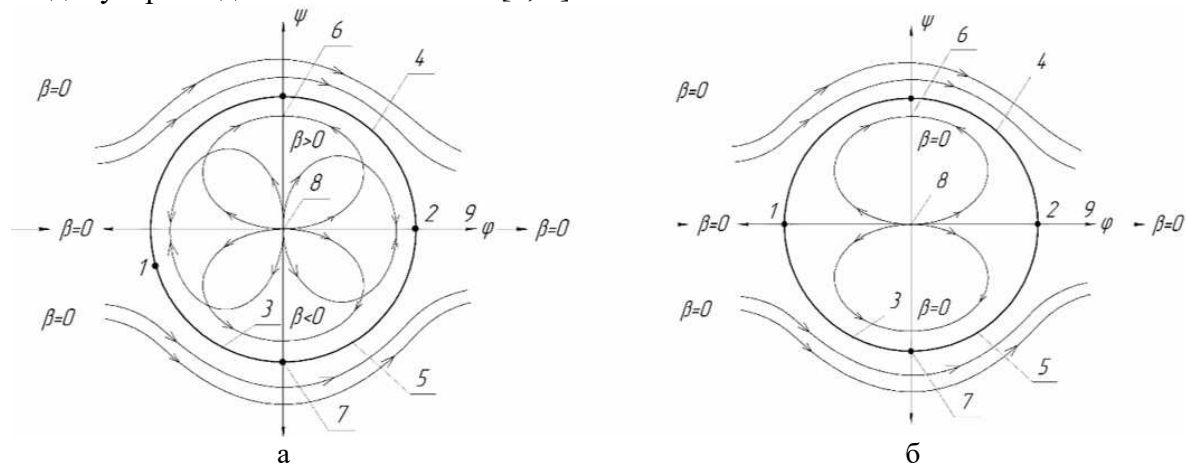


Рис. 1. Графическое изображение обтекания: а) не проницаемого круга, б) проницаемого круга с использованием однородного потока и одного, двух диполей соответственно с осями направленными вдоль 0φ и 0ψ : 1 – передняя критическая точка (ПКТ); 2 – задняя критическая точка (ЗКТ); 3 – средняя линия крылового профиля; 4 – тыльная поверхность крылового профиля; 5 – рабочая поверхность крылового профиля; 6 – сток; 7 – источник; 8 – диполь

Как известно действительная часть интеграла по замкнутому контуру от комплексной скорости, т.е. от производной комплексного потенциала по комплексной координате, равна циркуляции скорости γ по вышеуказанному контуру, а мнимая часть этого интеграла равно секундному объёмному расходу набегающего потока через вышеуказанный контур.

Таким образом, классическая теория обтекания непроницаемых тел предполагает, что в области течения функция тока $\beta = \cos t$, поскольку интеграл $\oint d\beta = 0$.

Учитывая вышеуказанные свойства функций комплексных переменных для построения комплексного потенциала природоподобного потока, воспользуемся принципом суперпозиции. Используя известный комплексный потенциал без циркуляционного обтекания круга радиусом r , наложив на него комплексный потенциал диполя с моментом m , расположенным вдоль мнимой оси координат 0ψ , получим:

$$P_n(\chi) = |V_\infty| \left(\chi + \frac{r^2}{\chi} \right) + \frac{q_i}{4\pi} \ln \chi, \quad (2)$$

где $q = 2\pi r \cdot k |V_\infty|$ – объёмный секунднй расход источника и стока диполя через замкнутый проницаемый контур; r_k – доля объёмного секундного расхода потока через замкнутый контур от набегающего потока.

С учётом вышесказанного определим сопряжённую скорость обтекания круга радиусом r с проницаемым контуром в виде:

$$\bar{V} = \frac{dP}{d\chi} = |V_\infty| \left(1 - \frac{r^2}{\chi^2} \right) + \frac{q_i}{4\pi\chi}. \quad (3)$$

Из решения квадратного уравнения (3) видно, что в зависимости от доли набегающего потока, используемой для формирования диполя в виде источника и стока через замкнутый проницаемый контур изменяется положение критических точек на круге радиуса r . При этом модуль каждого из корней равен r , т.е. критические точки, в которых сопряжённая комплексная скорость равна 0, расположены на окружности контура r . При $k = 0$, т.е. отсутствии диполя критические точки находятся на пересечении окружности контура с действительной осью 0ϕ , что соответствует без циркуляционному обтеканию. При $k = 2$, т.е. при условии, когда весь набегающий поток обтекающий замкнутый контур одновременно проходит через сток и источник диполя критические точки, в которых сопряжённая комплексная скорость равна 0 совпадают друг с другом и находятся на мнимой оси 0ψ в точке r_i [10].

Из сказанного видно, что при прохождении части набегающего потока через источник и сток диполя, расположенного по мнимой оси координат, возникает циркуляционное обтекание круга радиусом r с сохранением симметрии потока относительно мнимой оси 0ψ , однако с нарушением данной симметрии по отношению к действительной оси 0ϕ . По этой причине главный вектор сил давления потока на поверхность замкнутого контура отличается от 0 будучи направленным вдоль мнимой оси 0ψ .

С учётом (3) и выражения комплексного числа в виде показательной функции преобразуем сопряжённую комплексную скорость на контуре круга радиуса r в виде:

$$V = |V_\infty| e^{-i\theta} \cdot \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i} - \frac{krV_\infty}{r} e^{-i\theta} = e^{-i\theta} (2|V_\infty| \sin \theta - kV_\infty). \quad (4)$$

Таким образом, по аналогии с циркуляционным обтеканием круга радиуса r согласно общей теории Н.Е. Жуковского для проницаемого контура при без циркуляционном обтекании, т.е. без наложения на круг радиуса r вихря с циркуляцией γ результирующая подъёмная сила параллельная мнимой оси 0ψ , обусловленная перетеканием части набегающего со скоростью V_∞ потока при стоке и источнике расположенных симметрично действительной оси 0ψ равно произведению плотности потока на его расход через сток, источник и на скорость набегающего потока.

Возникновение результирующей подъёмной силы в данном случае аналогично принципу работы турбопаруса Кусто.

Результаты исследований

С учётом [2, 11] и (3) комплексный потенциал потока циркуляционного обтекания круга радиуса r с проницаемым контуром и углом ∞ между вектором набегающим потоком V_∞ и действительной осью 0ψ получим в виде:

$$P(\chi) = \overline{V_\infty} \chi + V_\infty \frac{r^2}{\chi} + (krV_\infty i \ln \chi + \frac{\gamma}{2\pi i} \ln \chi) + i(krV_\infty + \frac{\gamma}{2\pi}) \ln \chi. \quad (5)$$

Таким образом, приведённую циркуляцию потока, обтекающего круг радиусом r с проницаемым контуром, получим в виде:

$$\gamma_{\Pi} = k \cdot r \cdot |V_\infty| + \gamma. \quad (6)$$

С учётом общей теории Н.Е. Жуковского, графической модели конформного преобразования прямой решётки крыловых профилей с источником и стоком на тыльной и рабочей поверхностях соответственно в физической плоскости течения, на круг радиусом r с проницаемым контуром, содержащим диполь с источником и стоком на многолистной Римановой поверхности, приведённой на рисунке 2, постулата Жуковского – Чаплыгина – Кутта, преобразующей функции, осуществляющей конформное отображение решётки профилей в физической плоскости течения $Z = x + iy$ на круг радиусом r комплексного переменного $\chi = \varphi + i\psi$ Римановой плоскости, получим уравнение для расчёта циркуляции Γ_n потока вокруг прямой решётки профилей Н. Е. Жуковского с проницаемым контуром в виде:

$$\Gamma_{n2} = -4 \frac{\pi r}{f'_\infty} |V_\infty| \left(\sin \theta + \frac{k}{4\pi} \right), \quad (7)$$

где f'_∞ – производная от преобразующей функции конформного отображения контура крылового профиля Н.Е. Жуковского на круг радиуса r .

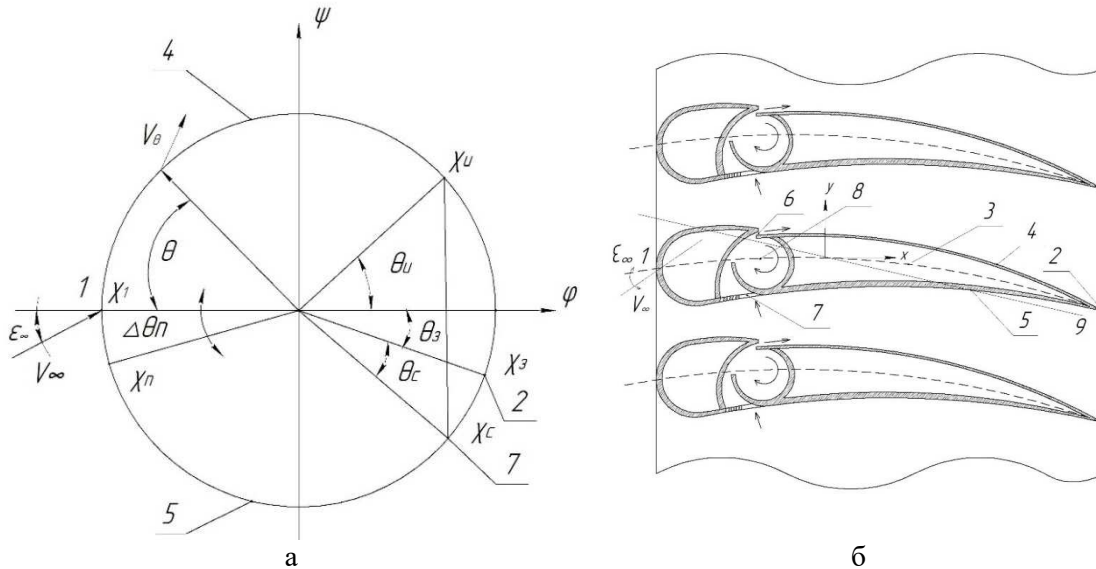


Рис. 2. а) Графическая модель конформного преобразования комплексного потенциала циркуляционного обтекания круга радиусом r с проницаемым контуром, содержащим диполь с источником и стоком многолистной Римановой поверхность D_χ на б) прямую решётку крыловых профилей с источником и стоком на тыльной и рабочей поверхностях соответственно в физической плоскости течения D_Z

Перетекание набегающего потока с помощью диполя создаёт дополнительную циркуляцию за счёт условного смещения передней критической точки крылового профиля. Необходимо учитывать, что при фактическом физическом смещения передней критической точки происходит увеличение угла набегающего потока, т.е. длины пути его движения и в

силу постулата Н.Е. Жуковского с учётом неразрывности потока увеличивается скорость, что снижает давление, создавая результирующую подъёмную силу. При перетекании потока в силу пористости контура скорость его увеличивается за счёт сложения с секундным расходом от источника или уменьшается за счёт вычитания секундного расхода стока диполя. В этом случае передняя критическая точка физически не смещается, т.е. не происходит фактического увеличения угла набегающего потока в результате чего исключается отрывное вихреобразование, обеспечивается плавное обтекание в широком диапазоне изменения результирующей подъёмной силы [12, 13].

Учитывая, что согласно постулату Жуковского – Чаплыгина – Кутта, скорость в ЗКТ должна быть равна 0, т.е. должно быть обеспечено плавно её обтекание потоков из области повышенного и пониженного давления угол условного смещения передней критической точки (ПКТ) в область повышенного давления можно определить по формуле:

$$\Delta\theta_n = \theta + ra \sin \left(\frac{k}{\pi \sin^2 \theta_d} - \sin^2 0,5\theta_d \right). \quad (8)$$

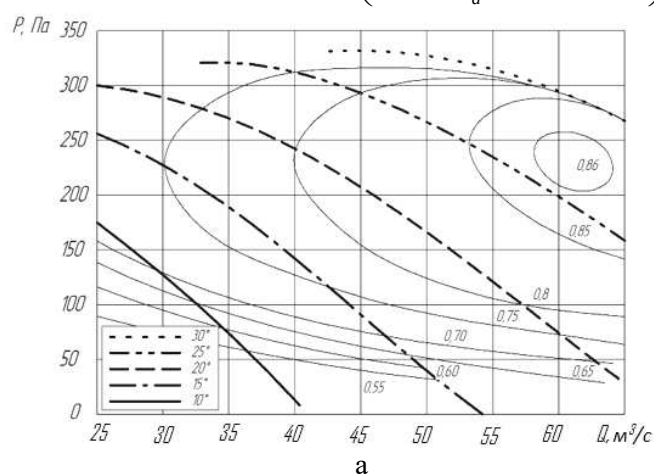


Рис. 3. Аэродинамическая характеристика вентиляторной установки ВУ 2,5-1,8К4 (а); вентиляторная установка ВУ 2,5-1,8К4 на стенде для аэродинамических испытаний (б)

В целях верификации предложенной математической модели расчёта прямых решёток профилей с проницаемым контуром была разработана аэродинамическая схема OV-121Д большой удельной быстроходности $n_y \geq 360$ и создан опытно промышленный образец вентиляторной установки ВУ 2,5-1,8К4 [14, 15].

Из анализа приведённой на рисунке 3 аэродинамической характеристики вышеуказанной вентиляторной установки ВУ 2,5-1,8К4 видно, что её статический КПД равный 0,79 на 8% и полное давление на номинальном режиме равно 240 Па на 20% выше показателей наиболее совершенных вентиляторных установок фирмы ГЕА (Германия).

Закключение

По итогам приведенных в статье математических и экспериментальных исследований можно сделать вывод об актуальности и целесообразности использования проницаемых профилей для создания лопаток рабочих колес вентиляторов, используемых на горно-металлургических предприятиях, компрессорных станциях магистральных газопроводов, сухих градирнях, то есть для вентиляторов в широком диапазоне удельной быстроходности.

Доказана актуальность использования активных методов управления обтеканием лопаток рабочих колёс в целях повышения энергоэффективности вентиляторов.

Предложен комплексный потенциал потока, обтекающего замкнутый контур с возможностью перетекания части потока из области повышенного давления в область пониженного давления, в целях управления результирующей подъёмной силой за счёт перераспределения расхода потока.

По аналогии с общей теорией Н.Е. Жуковского для проницаемого контура результирующая подъёмная сила, обусловленная перетеканием части набегающего потока, равна произведению плотности потока на его расход через сток, источник и на скорость набегающего потока.

Созданная в целях верификации на базе предложенной математической модели вентиляторная установка ВУ 2,5-1,8К4 позволила повысить на 8% КПД и на 20% развиваемое давление в сравнении с показателями наиболее совершенных вентиляторных установок фирмы ГЕА (Германия).

Список литературы

1. 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.
2. Полянский И.С., Логинов К.О. Приближённый метод решения задачи конформного отображения произвольного многоугольника на единичный круг // Вестник Удмуртского университета. – 2022. – Т. 32, вып. 1. – С. 107-129. – DOI: 10.35634/vm220108.
3. Nasser M.M.S., Vuorinen M. Conformal invariants in simply connected domains // Computational Methods and Function Theory. 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 747-775. DOI: 10.1007/s40119-020-00351-8.
4. Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Dr. Mr. Satyajeet Deshmukh. Parameters affecting efficiency of centrifugal pump – a review // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. 2021, no. 8, pp. 49-58. DOI: 10.32628/IJSRST218573.
5. Макаров В.Н., Неволин В.В., Макаров Н.В., Ахметов Р.Г., Таланкин Н.Н. Доминанта повышения эффективности аппаратов воздушного охлаждения для нефтегазового комплекса // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – №48. – С. 98-126. – DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.05.
6. 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, pp. 42-51. DOI: 10.7166/32-3-2616.
7. Босиков И.И., Ключев Р.В., Силаев И.В., Пилюева Д.Э. Оценка параметров многостадийного гидравлического разрыва пласта с помощью 4D моделирования // Горные науки и технологии. – 2023 – №8(2). – С. 141-149. – DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-97.
8. Федяков А.О. Повышение эффективности работы центробежных насосов // Вестник науки. – 2024. – №12(81). – С. 1278-1285.
9. Алыменко Н.И., Николаев А.В., Каменских А.А., Тронин А.П. Результаты исследования системы вентиляции рудника БКПРУ-2 в холодное время года // Вестник Пермского университета. Геология. – 2011. – №3. – С. 89-96.
10. Ганзуленко О.Ю., Петкова А.П. Энергоэффективность линейного реечного привода штанговых глубинных насосов // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 325-338.
11. 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, pp. 575-579. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5.
12. Макаров Н.В., Антропов Л.А., Макаров В.Н., Баландин В.Н. Разработка методологии создания энергоэффективных вентиляторов для аппаратов воздушного охлаждения. – Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 14, №4. – С. 1081-1089. – DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-1081-1089.
13. Квашнин Л., Аверкин А.К. вопросу совершенствования современных вентиляторов // Norwegian Journal of development of the International Science. – 2020. – №47. – С. 43-46.
14. Шлеин Г.А., Клещенко И.И., Балувев А.А., Семененко А.Ф. Перспективы развития струйной техники и технологии в нефтегазовой отрасли // Нефть и газ. – 2020. – №3(141). – С. 75-88. – DOI: 10.31660/0445-0108-2020-3-75-88.
15. 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 высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – №4. – С. 55-67. – DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-55-67.

References

1. Kovalchuk M.V., Naraykin O.S., Yatsishina E.B. Nature-like technologies: new opportunities and new challenges // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019, vol. 89, no. 5, pp. 455-465. DOI: 10/31857/S0869-5873895455-465.
2. Polyansky I.S., Loginov K.O. An approximate method for solving the problem of conformal mapping of an arbitrary polygon onto a unit circle // Bulletin of Udmurt University. 2022, vol. 32, iss. 1, pp. 107-129. DOI: 10.35634/vm220108.

3. Nasser M.M.S., Vuorinen M. Conformal invariants in simply connected domains // Computational Methods and Function Theory. 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 747-775. DOI: 10.1007/s40119-020-00351-8.
4. Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Dr. Mr. Satyaheet Deshmukh. Parameters affecting efficiency of centrifugal pump – a review // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. 2021, no. 8, pp. 49-58. DOI: 10.32628/IJSRST218573.
5. Makarov V.N., Nevolin V.V., Makarov N.V., Akhmetov R.G., Talankin N.N. The Dominant Factor of Increasing the Efficiency of Air Cooling Devices for the Oil and Gas Complex // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems. 2023, no. 48, pp. 98-126. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.05.
6. 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, pp. 42-51. DOI: 10.7166/32-3-2616.
7. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Silaev I. V., Piliyeva D. E. Estimation of multistage hydraulic fracturing parameters using 4D simulation // Mining Science and Technology (Russia). – 2023 – №8(2). – pp. 141-149. – DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-97.
8. Fedyakov A.O. Improving the efficiency of centrifugal pumps // Bulletin of Science. 2024, no. 12(81), pp. 1278-1285.
9. Alymenko N.I., Nikolaev A.V., Kamenskikh A.A., Tronin A.P. Results of a study of the ventilation system of the BKPRU-2 mine in the cold season // Bulletin of Perm University. Geology. 2011, no. 3, pp. 89-96.
10. Ganzulenko O.Yu., Petkova A.P. Energy efficiency of the linear rack drive for sucker rod pumping units // Journal of Mining Institute. 2023, vol. 261, pp. 325-338.
11. 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, pp. 575-579. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5.
12. Makarov N.V., Antropov L.A., Makarov V.N., Balandin V.N. Development of a methodology for creating energy-efficient fans for air cooling devices // Sustainable Development of Mountainous Territories. 2023, vol. 14, no. 4, pp. 1081-1089. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-1081-1089.
13. Kvashnin L., Averkin A. On the issue of improving modern fans // Norwegian Journal of development of the International Science. 2020, no. 47, pp. 43-46.
14. Shlein G.A., Kleshchenko I.I., Baluev A.A., Semenenko A.F. Prospects for the development of jet technology and equipment in the oil and gas industry // Oil and Gas. 2020, no. 3, pp. 75-88.
15. Makarov V.N., Belskikh A.M., Makarov N.V., Churakov E.O., Dyldin G.P. Improving fans for air cooling devices based on nature-like proportionality // News of higher educational institutions. Mining Journal. 2023, no. 4, pp. 55-67. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-55-67.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Макаров Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор	Makarov Nikolay Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor, director
mnikolay84@mail.ru	

Получена 09.04.2026