

**МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ВЫЧЕТОВ ДЛЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО
РАСЧЕТА ВИХРЕВОГО РЕГУЛЯТОРА ТУРБОМАШИН**

**MODIFICATION OF RESIDUES METHOD FOR AERODYNAMIC CALCULATION
OF VORTEX REGULATOR OF TURBOMACHINES**



Н. В. Макаров,
*Уральский государственный
горный университет,
г. Екатеринбург
mnikolay84@mail.ru*

N. Makarov,
*Ural State Mining University,
Yekaterinburg*



В. Н. Макаров,
*Уральский государственный
горный университет,
г. Екатеринбург
uk.intelnedra@gmail.com*

V. Makarov,
*Ural State Mining University,
Yekaterinburg*



В. Я. Потапов,
*Уральский государственный
горный университет,
г. Екатеринбург
2c1@inbox.ru*

V. Potapov,
*Ural State Mining University,
Yekaterinburg*

Статья посвящена разработке методологии проектирования и создания природоподобных адаптивных шахтных турбомашин, адекватно и одновременно экономически обоснованно создающих необходимые поля депрессий, реализующих концепцию оптимальной экотехнологии недропользования.

Для создания математического аппарата проектирования адаптивных турбомашин, совершенствования способов их регулирования разработана математическая модель вихревого регулятора в форме круговой решетки аналитических профилей произвольной формы. Для модификации метода особых точек Чаплыгина использована классическая теория вычетов с учетом принципа суперпозиции в условиях гидродинамической аналогии и метода конформного отображения вихревого регулятора на каноническую область в виде круга единичного радиуса. Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием статического метода линейного планирования эксперимента.

На базе анализа предложенной теории аэродинамического расчета вихревого регулятора и построения его радиальной аэродинамической схемы сформулированы основные пути дальнейшего совершенствования методики проектирования и создания эффективных энергетических регуляторов шахтных турбомашин.

Проведены испытания радиального энергетического регулятора, реализующего данный способ управления аэродинамическими параметрами вентилятора. Отмечено, что предложенное устройство способствует снижению удельного энергопотребления вентиляторов на 8 % и увеличению глубины регулирования по давлению на 15 %, что эквивалентно годовому экономическому эффекту, соизмеримому со стоимостью вентилятора

Ключевые слова: турбомашин; шахтный вентилятор; вихревой регулятор; аэродинамика; управляющий поток; регулирование режима работы турбомашин; адаптивность турбомашин; экономичность турбомашин; метод особых точек; гидродинамическая аналогия

The article is devoted to the development of a methodology for the design and creation of nature-friendly adaptive mine turbomachines, that adequately and simultaneously economically justifies creating the necessary fields of depressions that implement the concept of optimal ecotechnology of subsoil use.

To create a mathematical apparatus for designing adaptive turbomachines, improving the methods for their regulation, a mathematical model of a vortex regulator in the form of a circular grating of analytical profiles of arbitrary shape, was developed. To modify the method of Chaplygin singular points, the classical theory of residues is used, taking into account the superposition principle in conditions of hydrodynamic analogy and method of conformal mapping of vortex regulator to the canonical field in the form of a circle of unit radius. The experimental results were processed, using the static method of linear experiment planning.

Based on the analysis of the proposed theory of aerodynamic calculation of a vortex regulator and construction of its radial aerodynamic scheme, the main ways of further improving the methodology for designing and creating efficient power regulators of mine turbomachines are formulated.

Radial power tests of the regulator, realizing this method of controlling the aerodynamic parameters of the fan, are carried out. The proposed device contributes to a reduction in the specific energy consumption of the fans by 8 % and an increase in the depth of the pressure regulation by 15 %, which is equivalent to an annual economic effect commensurate with the cost of the fan

Key words: turbomachines; mine fan; vortex regulator; aerodynamics; control flow; regulation of turbomachine operation mode; adaptability of turbomachines; economy of turbomachines; method of singular points; hydrodynamic analogy

Введение. Повышение конкурентоспособности горных предприятий, рост нагрузки на очистной забой в сочетании с требованием обеспечения промышленной, санитарно-гигиенической и аэрогазодинамической безопасности актуализируют задачу разработки методологии проектирования вихревых регуляторов для создания природоподобных адаптивных шахтных турбомашин, адекватно и одновременно экономически обоснованно создающих необходимые поля депрессий, реализующих концепцию оптимальной экотехнологии недропользования.

Конструктивные особенности шахтных радиальных вентиляторов позволяют реализовать активные вихревые методы управления их аэродинамическими параметрами с использованием вихревых регуляторов.

Методика и методология исследования. Для разработки математической модели вихревого регулятора турбомашин использован метод особых точек С. А. Чаплыгина с учетом принципа суперпозиции в условиях гидродинамической аналогии и метода конформного отображения вихревого регулятора на каноническую область в виде круга единичного радиуса. Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием статического метода линейного планирования эксперимента.

Основными принципами и допущениями методики проведения теоретических и экспериментальных исследований для построения математической модели вихревого регулятора, экспериментальной проверки достаточной достоверности математической модели являются следующие положения и допущения:

– профили вихревого регулятора принимаются в качестве гладких линий, описываемых аналитическими функциями, в частности, логарифмическими спиралями;

– теоретические исследования проведены в предположении, что во всей области течения римановой поверхности течение стационарно, безвихревое, жидкость идеальна, несжимаема, невесома и константа Бернулли постоянна;

– теория вычетов используется с учетом интегралов Коши, позволяющих производить вычисление энергетических характеристик точечных локальных присоединенных вихрей, имитирующих вихревой регулятор;

– для обеспечения однозначности решения с точностью до константы используется принцип Жуковского – Чаплыгина – Кутта о сходе потока с угловой точки лопаток вихревого регулятора.

Экспериментальные исследования проводились на базе статистического метода линейного планирования эксперимента для

определения рациональных геометрических параметров вихревого регулятора.

Вентиляционные режимы, изменяющиеся с течением времени, связанные с организационно-технологическими процессами на горном предприятии, предъявляют к вентилятору жесткие требования высокой адаптивности, т. е. способности экономично обеспечивать требуемый режим проветривания [1; 7].

Анализ существующих способов повышения адаптивности шахтных радиальных вентиляторов подтверждает высокие потенциальные возможности применения вихревых регуляторов (ВР) [8; 10; 11].

Для разработки устройств управления циркуляцией необходимо установить зависимость между энергетическими характеристиками управляющего потока, параметрами ВР, геометрией рабочего колеса и его аэродинамическими характеристиками.

Для аэродинамического расчета ВР с радиальной решеткой профилей произвольной формы с закрученным управляющим потоком на входе наиболее целесообразен метод конформных отображений. Сущность данного метода заключается в использовании конформного отображения области вне радиальной решетки профилей ВР на некоторую вспомогательную более простую область, в частности, на внешность круга единичного радиуса [2].

Указанная задача сводится к отысканию двух аналитических функций: отображения области течения, ограниченной радиальной решеткой профилей ВР на внешность круга единичного радиуса, и комплексного потенциала в плоскости данного круга. Однако непосредственное применение этого метода представляет некоторые трудности ввиду наличия управляющего потока на входе в решетку профилей ВР, что приводит к появлению дополнительных особенностей и необходимости установления условий однозначности в расчетах. Следует иметь в виду, что управляющий поток кинематически является циркуляционным и его энергетические параметры зависят от параметров и режимов работы вентилятора [3].

Сложность задачи построения теории аэродинамики ВР с конфузорной радиальной решеткой профилей произвольной формы заключается во взаимодействии энергетических характеристик управляющего потока на входе в ВР с параметрами течения на входе в вентилятор. Кроме того, известные методы рассматривают теорию конфузорной радиальной решетки профилей без управляющего потока на входе, при которой осуществляются конформные отображения однолистной римановой области без сингулярной особенности решетки на внешность многолистной канонической области.

В рассматриваемой задаче использование базового принципа конформного преобразования для построения канонического потенциала течения приводит к необходимости конформной однолистной многолистной римановой области конфузорной радиальной решетки профилей ВР на многолистную каноническую область с сингулярной особенностью в виде внешнего вихря из бесконечности на плоскости течения однолистной римановой области. При этом необходимо получить комплексный потенциал течения на многолистной канонической области и доказать его единственность [4; 5].

Для построения математической модели аэродинамики ВР разработана модификация метода особых точек (вычетов) С. А. Чаплыгина с учетом принципа суперпозиции в условиях гидродинамической аналогии.

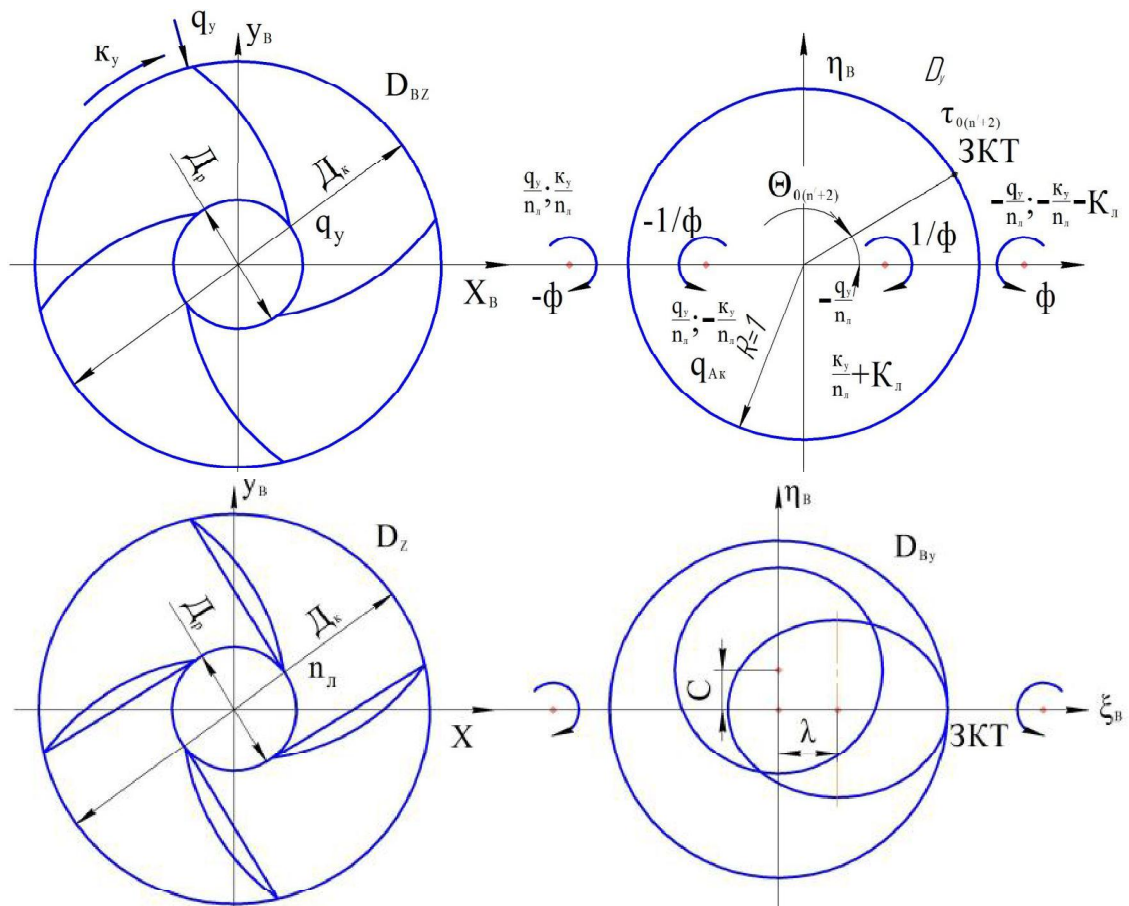
Вихревые регуляторы, представляющие собой радиальную решетку аналитических профилей произвольной формы, согласно общей постановке задачи, в плоском случае с n профилями, ставятся в однолистной обтекаемый контур. Мы предположили, что во всей области течения D_z на однолистной римановой поверхности течения стационарное и безвихревое, жидкость идеальная, несжимаемая, невесомая и константа Бернулли постоянна.

Точное решение задачи его обтекания несжимаемой жидкостью сводим к построению двух аналитических функций — функ-

ции $Z(\gamma)$ отображения внешности D_γ круга единичного радиуса на область течения D_z , ограниченную однолиственным контуром, и комплексного потенциала $F[z(\gamma)]$ в плоскости круга единичного радиуса. Для произвольного однолиственного контура построение функции $Z(\gamma)$ требует дополнительного отображения области, деформированного круга на круг, аналогично используемому в методах расчета обтекания произвольного твердого профиля.

Поскольку профили круговой решетки ВР представляют собой аналитические гладкие профили произвольной формы, то конформное отображение получаем в два этапа. На первом определяем функцию конформного отображения n_λ -листной римановой поверхности внешности круга единич-

ного радиуса D_γ , содержащую информацию об эквивалентной исходной решетке профилей ВР, в виде трансформированной в круговую решетку, составленную из профилей в форме отрезков логарифмических спиралей, на внешность n_λ -листной римановой поверхности D_{vy} деформированного круга (овала), идентифицирующего геометрию исходной круговой решетки профилей. На втором этапе осуществляем конформное отображение внешности n_λ -листной римановой поверхности деформированного круга в области D_{vy} на однолиственную римановую поверхность D_z схематизированного контура ВР в форме круговой решетки аналитических профилей произвольной формы, что представлено на рисунке.



Принципиальная схема последовательности конформных преобразований:

- а – преобразование n_λ -листной области D_γ в n_λ -лиственную область D_{vy} ;
 - б – преобразование n_λ -листной области D_{vy} в $(n_\lambda + 1)$ -лиственную область D_z /
- Schematic diagram of conformal transformations sequence:
- a – transformation of the n_λ -sheeted region D_γ into the n_λ -sheeted domain D_{vy} ;
 - b – transformation of an n_λ -fold domain D_{vy} into an $(n_\lambda + 1)$ -like domain D_z

Использование метода конформного отображения для рассмотрения аэродинамики ВР приводит к необходимости конформного отображения многолистной односвязной области на однолиственную односвязную область [2; 4]. Поскольку, в случае применения метода конформного отображения для исследования аэродинамики ВР в форме радиальной решетки с n_{β} -профилями необходимо осуществить конформное отображение однолистной римановой поверхности внешности круга единичного радиуса на однолиственную область контура схематизированной круговой решетки ВР, то для обеспечения единственности решения следует добиться однозначности n_{β} -отображений на круге единичного радиуса. Так как в схематизированной радиальной решетке ВР профили установлены с постоянным периодом, то для обеспечения однозначности отображения всей решетки выберем константы отображения таким образом, чтобы точки $z = 0$ и $z = \infty$ на области D_z перешли в две симметричные относительно начала координат точки $\gamma = \Phi$ и $\gamma = -\Phi$ на области D_{γ} .

Формпараметр Φ характеризует исходную аэродинамическую нагруженность радиальной решетки профилей, являясь гидродинамическим аналогом ее безциркуляционного обтекания при нулевых расходах устройств управления $Q_{Ak} = 0$, и определяется геометрическими параметрами круговой решетки профилей.

Функции комплексного отображения $Z(\gamma)$ с использованием принципа гидродинамической аналогии получим в виде

$$n_{\beta} \ln z = \ln \frac{(\gamma + \Phi)}{(\gamma - \Phi)} + e^{2i\beta_{\beta} + c} \ln \frac{(\gamma - \Phi_1^{-1} e^{i\theta_1})}{(\gamma - \Phi_2^{-1} e^{i\theta_2})}, \quad (1)$$

$$z = \left[\frac{(\gamma + \Phi)}{(\gamma - \Phi)} \right]^{\frac{1}{n_{\beta}}} \left[\frac{(\gamma - \Phi_1^{-1} e^{i\theta_1})}{(\gamma - \Phi_2^{-1} e^{i\theta_2})} \right]^{\frac{(2i\beta_{\beta} + c)}{n_{\beta}}}, \quad (2)$$

где $z = re^{iv}$, $\gamma = \rho e^{i\theta}$ — комплексные координаты точек в областях D_z и D_{γ} соответственно; r ,

v — радиус и полярный угол на плоскости Z соответственно; ρ ,

θ — радиус и полярный угол на плоскости γ соответственно;

Φ — формпараметр эквивалентной радиальной решетки профилей в виде отрезков логарифмических спиралей;

β_{β} — угол логарифмической спирали эквивалентной решетки профилей;

$\gamma_1 = \Phi_1^{-1} e^{i\theta_1}$, $\gamma_2 = \Phi_2^{-1} e^{i\theta_2}$, $K_{\Phi} = e^{2i\beta_{\beta} + c}$ — комплексные параметры, определяющие форму профиля исходной круговой решетки аналитических профилей.

Особые точки отображения γ_{01} , γ_{02} определяем из условия нарушения конформности

$$n_{\beta} z_0^{-1} \frac{dz}{d\gamma_{\gamma_0}} = \frac{2\Phi}{(\gamma_0^2 - \Phi^2)} + e^{2i\beta_{\beta} + c} \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)}{(\gamma_0 - \gamma_1)(\gamma_0 - \gamma_2)} = 0, \quad (3)$$

из которого для γ_0^2 получаем уравнение

$$\gamma_0^2 - \frac{[2\Phi(\gamma_1 + \gamma_2) + \Phi e^{2i\beta_{\beta} + c} (\gamma_1 - \gamma_2)]}{[e^{2i\beta_{\beta} + c} (\gamma_1 - \gamma_2) - 2\Phi]} + \frac{2\Phi(\gamma_1 + \gamma_2)}{[e^{2i\beta_{\beta} + c} (\gamma_1 - \gamma_2) - 2\Phi]} = 0. \quad (4)$$

С учетом уравнения (4) получим систему двух уравнений для определения γ_1 и γ_2

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{[(\gamma_{01} + \gamma_{02})(K_{\Phi} \gamma_2 + 2\Phi - 2\Phi_2)]}{[K_{\Phi}(\gamma_{01} + \gamma_{02}) + 2\Phi]}; \\ \gamma_2^2 + \Phi \frac{[2\gamma_{01}\gamma_{02} - K(\gamma_{01} + \gamma_{02})]}{[2\Phi - K_{\Phi}(\gamma_{01} - \gamma_{02})]} - 2\gamma_2 \frac{[\Phi(\Phi_{01} + \gamma_{02}) - (\Phi^2 + \gamma_{01}\gamma_{02})K_{\Phi}]}{[2\Phi - K_{\Phi}(\gamma_{01} + \gamma_{02})]} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, сформулирован математический аппарат построения комплексной функции $z(\gamma)$, осуществляющий конформное отображение n_{β} -листной римановой поверхности внешности круга единичного радиуса области D_{γ} на однолиственную римановую поверхность контура схематизированной круговой решетки ВР с аналитическими профилями гладкой формы области D_z .

Для построения комплексного потенциала $F[Z(\gamma)]$ в однолистной римановой поверхности внешности круга единичного радиуса области D_{γ} воспользуемся методом аддитивности [2].

В условиях гидродинамической аналогии комплексный потенциал может быть построен методом аддитивности, т. е. наложения с учетом того, что значение цир-

куляции по любой односвязной замкнутой линии, содержащей внутри круг единичного радиуса в области D_γ , в соответствии с теоремой Гельмгольца, в данном случае с точностью до константы, равно циркуляции K_n

вокруг однолистного контура круговой решетки профилей ВР [3].

После соответствующих преобразований комплексный потенциал течения $F[Z(\gamma)]$ имеет вид

$$F[z(\gamma)] = \varphi[z(\gamma)] + i\psi_0[z(\gamma)] = \frac{q \ln \frac{(\gamma + \Phi)(\gamma + \frac{1}{\Phi})}{(\gamma - \Phi)(\gamma - \frac{1}{\Phi})} - \frac{K_n - n_n K_n}{i} \ln \frac{(\gamma - \frac{1}{\Phi})}{\gamma - \Phi} - \frac{iK_n \ln \frac{\gamma + \Phi}{\gamma + \frac{1}{\Phi}}}{(\gamma + \frac{1}{\Phi})}}{2\pi n_n}, \quad (6)$$

где q — коэффициент расхода стока, направленного в центр радиальной решетки профилей ВР в области D_z ;

K_n — интенсивность вихря (циркуляция), с центром в круговой решетке профилей ВР в области D_z , определяемая вращением потоков в полости высокого давления корпуса вентилятора на входе в ВР;

K_n — интенсивность вихря (циркуляция) вокруг профиля круговой решетки в плоскости D_z ;

φ — функция потенциала течения в области D_γ ;

ψ — функция тока (линия тока) течения в области D_γ .

Построенное решение при заданных q , K_n , K_n и локальных является, с точностью до константы, единственным. Действительно, если предположить, что решений два: $F_1[Z(\gamma)]$, $F_2[Z(\gamma)]$, и рассмотреть функцию $\Delta(\gamma) = F_1[Z(\gamma)] - F_2[Z(\gamma)]$, то можно видеть, что эта функция — однозначная вне круга и что на круге и на бесконечности $\text{Im}\Delta(\gamma) = 0$. Отсюда, по теореме единственности решения задачи Дирихле — Неймана должно быть $\text{Im}\Delta(\xi) \equiv 0$, а значит $F_1[Z(\gamma)] - F_2[Z(\gamma)] \equiv \text{const}$.

Учитывая единственность, с точностью до константы, решения для функции $F[Z(\gamma)] = W(\gamma)$ и условия единственности конформного отображения при заданном n_n -листном контуре, получим, с точностью до константы, единственное решение задачи обтекания указанного однолистного контура круговой решетки аналитических профилей ВР

$$F(Z) = W[\gamma(Z)]. \quad (7)$$

Учитывая, что комплексная скорость течения равна производной от комплексного потенциала, с учетом (6) для определения положения задней критической точки профиля круговой решетки и, соответственно, единственного значения циркуляции K_n , используем известную гипотезу Жуковского — Чаплыгина — Кутта [5].

Полагая, что $\tau_s = e^{j\theta}$, соответствует задней критической точке профиля, где нарушено условие конформности отображения $\frac{dz}{d\tau_s} = 0$ с учетом (7) формула для расчета коэффициента циркуляции K_n примет вид

$$K_n = \frac{4q\Phi(\Phi^2 + 1)\text{Sin}\theta_z}{n_n} (\Phi^2 - 1)(\Phi^2 - 2\Phi\text{Cos}\theta_{0(\bar{n}+2)} + 1) - \frac{4K_n\Phi\text{Cos}\theta_z}{n_n} (\Phi^2 + 2\Phi\text{Cos}\theta_z + 1). \quad (8)$$

Таким образом, приведенные теоретические исследования позволяют решить задачу аэродинамики ВР с радиальной решеткой аналитических профилей гладкой формы [6; 9].

Полученные уравнения позволяют в обобщенном виде представить характеристики потенциального обтекания широкого класса ВР с радиальными решетками профилей, установить наиболее характерные особенности и закономерности данного класса энергетических регуляторов, исследовать их эффективность, регулируемость и адаптивность центробежных вентиляторов (ГОСТ 10921-90. Вентиляторы ради-

альные (центробежные) и осевые. Методы аэродинамических испытаний).

На базе предложенной математической модели спроектирован радиальный вихревой регулятор (РВР 84-96). Проведенные аэродинамические испытания подтвердили достаточную сходимость результатов эксперимента и предложенной математической модели. Применение вихревого регулятора РВР позволяет увеличить глубину экономичного регулирования радиального вентилятора на 15 %, существенно расширив область его экономичной работы.

Выводы. 1. Разработана математическая модель вихревого регулятора шахтных турбомашин, на базе которой предложена методика проектирования аэродинамических схем радиальных вихревых вентиляторов.

2. На базе разработанной методики спроектирован радиальный вихревой регулятор (РВР 84-96).

3. Применение вихревого регулятора РВР 84-96 совместно с вентилятором местного проветривания ВРВП-6 повышает его адаптивность на 70 %, снижая годовые расходы на электроэнергию в сумме, соизмеримой со стоимостью вентилятора.

Список литературы

1. Бабак Г. А., Макаров В. Н. Регулирование центробежных вентиляторов энергетическим направляющим аппаратом // Проблемы совершенствования пылегазового режима на угольных шахтах: тезисы докладов на республ. конф. Донецк: НИИГМ им. Федорова, 1988.
2. Белоцерковский С. М., Лифанов И. К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях. М.: Наука, 1985. 256 с.
3. Горлин С. М. Экспериментальная аэродинамика. М.: Высш. шк., 1970. 423 с.
4. Идельчик И. Е. Аэродинамика технологических аппаратов. М.: Машиностроение, 1983. 351 с.
5. Ковалевская В. И. Регулирование центробежных вентиляторов // Изв. вузов. Горный журнал. 1983. № 3. С. 81–86.
6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
7. Макаров Н. В., Патракеева И. Ю., Костюк П. А. Динамика вентиляционных режимов вентиляторов местного проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. 2016. № 4. С. 62–67.
8. Патент 2390657 РФ. Центробежный вентилятор / Н. В. Макаров, С. В. Белов, В. И. Фомиц, В. Н. Макаров, С. А. Волков; заявл. 02.04.2008; опубл. 2009. Бюл. № 28.
9. Malmyth N. D., Marlhi V. D., Kole D. D. Studies of upper surface blown airfoils in jucompressible and transuic flow // AIAA. 1980. No. 18. P. 14–16.
10. Mendelehall M. R., Spangler S. B. Calculation of the Longitudinal Aerodyn_n-valent Riemannian domain D_7 namic Characteristics of Upper Surface Blow Wing Flap Configurations // AIAA. 1979. No. 120.
11. Rossow V. J. Lift enhacement by an externally trapped vortex // J. Aircraft. 1978. Vol. 15. No. 9. P. 618–625.

References

1. Babak G. A., Makarov V. N. *Problemy sovershenstvovaniya pylegazovogo rezhima na ugolnyh shahтах: tezisy dokladov na respubl. konf.* (Problems of improving the dust and gas regime in coal mines: abstracts of papers for the republic. conf.). Donetsk: NIIGM named after Fedorov, 1988.
2. Belotserkovsky S. M., Lifanov I. K. *Chislennyye metody v singulyarnykh integralnykh uravneniyah* (Numerical methods in singular integral equations). Moscow: Nauka, 1985. 256 p.
3. Gorlin S. M. *Ekspperimentalnaya aerodinamika* (Experimental aerodynamics). Moscow: Higher School, 1970. 423 p.
4. Idelehhik I. E. *Aerodinamika tekhnologicheskikh apparatov* (Aerodynamics of technological devices). Moscow: Mechanical Engineering, 1983. 351 p.
5. Kovalevskaya V. I. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* (Proceedings of high schools. Mining Journal), 1983. no. 3, pp. 81–86.
6. Loitsyansky L. G. *Mehanika zhidkosti i gaza* (Mechanics of fluid and gas). Moscow: Nauka, 1978. 736 p.
7. Makarov N. V., Patrakeeva I. Yu., Kostyuk P. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten MGGU* (Mining information-analytical bulletin of MSMU), 2016, no. 4, pp. 62–67.

8. *Patent 2390657 RF* (Patent 2390657 of the Russian Federation) / N. V. Makarov, S. V. Belov, V. I. Fomin, V. N. Makarov, S. A. Volkov; stated on 02.04.2008; publ. 2009. Bul. № 28.
9. Malmuth N. D., Marlhi V. D., Kole D. D. *AIAA* (AIAA), 1980, no. 18, pp. 14–16.
10. Mendelehall M. R., Spangler S. B. *AIAA* (AIAA), 1979, no. 120.
11. Rossow V. J. *J. Aircraft* (J. Aircraft), 1978, vol. 15, no. 9, pp. 618–625.

Коротко об авторах

Макаров Николай Владимирович, канд. техн. наук, зав. кафедрой горной механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование
mnikolay84@mail.ru

Макаров Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры горной механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование
uk.intelnedra@gmail.com

Потапов Валентин Яковлевич, д-р техн. наук, профессор кафедры горной механики, профессор, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование
2c1@inbox.ru

Briefly about the authors

Nikolay Makarov, candidate of technical sciences, head of the Mining Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Vladimir Makarov, doctor of technical sciences, professor, Mining Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Valentin Potapov, doctor of technical sciences, professor, Technical Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Образец цитирования

Макаров Н. В., Макаров В. П., Потапов В. Я. Модификация метода вычетов для аэродинамического расчета вихревого регулятора турбомашин // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 7. С. 33–40. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-7-33-40.

Makarov N., Makarov V., Potapov V. Modification of residues method for aerodynamic calculation of vortex regulator of turbomachines // Transbaikal State University Journal, 2018, vol. 24, no. 7. pp. 33–40. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-7-33-40.

Статья поступила в редакцию: 11.04.2018 г.
Статья принята к публикации: 14.09.2018 г.

