УДК 622.44 DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-92-100

Метод эффективного регулирования циркуляции в рабочих колесах вентиляторов большой быстроходности

Макаров В. Н.[1]*, Макаров Н. В.[1], Молчанов М. В.[2], Угольников А. В.[1], Бельских А. М.[1]

[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

[2] Научно-исследовательский и проектный институт «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

e-mail: uk.intelnedra@gmail.com

Реферат

Актуальность исследований. *Обеспечение конкурентоспособности предприятий нефтегазового комплекса РФ на глобальном экономическом пространстве невозможно без ускорения темпов реструктуризации действующих и разработки новых аппаратов воздушного охлаждения с учетом передовых достижений горной науки, внедрения современной техники. Затраты на охлаждение газа при его транспортировании по магистральным газопроводам в структуре себестоимости достигают 22 %. При этом ежегодные непроизводительные затраты электроэнергии на охлаждение компримированного газа вентиляторными установками для аппаратов воздушного охлаждения соизмеримы с их стоимостью. Повышение экономичности и аэродинамической адаптивности вентиляторных установок воздушного охлаждения, влияющих на конкурентоспособность предприятий нефтегазового комплекса, требует разработки активных средств управления ими.*

Цель исследований. *Разработка математической модели активного управления параметрами вентиляторных установок.*

Методы исследований. *Основаны на экспериментально доказанной гипотезе о зависимости расхода управляющего потока на лопатках рабочего колеса с положением задних критических точек лопаток.*

Результаты исследований. *Разработан метод на базе конформных преобразований, теории вычетов, сингулярных уравнений и гидродинамической аналогии, получена зависимость положения критических точек профилей от циркуляции потока. Установлена зависимость аэродинамической адаптивности вентиляторных установок аппаратов воздушного охлаждения от положения эффективной критической точки и энергетических характеристик источника управления обтеканием лопаток рабочего колеса. Получен патент на рабочее колесо вентиляторной установки воздушного охлаждения с активным управлением циркуляцией от источников потока воздуха из корпуса вентилятора. Доказана высокая эффективность разработанного метода управления циркуляцией для повышения эксплуатационной экономичности, аэродинамической адаптивности вентиляторных установок воздушного охлаждения. Разработана аэродинамическая схема ОВ 121ТН, создана вентиляторная установка ОГМ.ВУ2,7-1,8К4 с увеличенной на 34 % аэродинамической адаптивностью.*

Ключевые слова: *вентиляторная установка; циркуляция; источник; аэродинамическая адаптивность; решетка профилей; конформное преобразование.*

Введение. Затраты на экотехнологии предприятий нефтегазового комплекса превышают 20 %, при этом 40 % электроэнергии расходуется неэффективно. Одной из основных причин непроизводительных затрат электроэнергии является низкая экономичность и недостаточная регулируемость, т. е. аэродинамическая адаптивность, применяемых в аппаратах воздушного охлаждения осевых вентиляторов большой быстроходности. Вентиляторы с большой быстроходностью характеризуются весьма низкими значениями параметров давления, создаваемого вентилятором в расчете на 1 м3 перемещаемого газа. По этой причине недо-

статочное аэродинамическое качество профилей лопаток и проточной части вентилятора, а также изменение режимов работы в связи с широким диапазоном перепада температур существенно снижают коэффициент полезного действия данного типа вентиляторов. Конкурентоспособность предприятия, его эффективность напрямую зависят от энергоемкости вентиляторных установок для аппаратов воздушного охлаждения вспомогательного технологического процесса, обеспечивающего экологическую безопасность. Недостаточная энергоэффективность вентиляторных установок тормозит использование инновационных технологий при транспортировании газа. Рост нагрузки на транспортные системы газоперекачивающих станций актуализирует задачу разработки математических моделей управления экономичностью вентиляторов большой быстроходности за счет активного регулирования циркуляционного течения в рабочих колесах для целенаправленного создания турбомашин с повышенной аэродинамической адаптивностью [1, 2].

Реальные возможности увеличения аэродинамической адаптивности вентиляторных установок воздушного охлаждения заложены в активных энергетических методах управления циркуляцией вокруг лопаток их рабочих колес.

Полости лопаток рабочих колес вентиляторных установок аппарата воздушного охлаждения, выполненные в форме каналов, вписанных в их профили, представляют собой источники управления энергетическим взаимодействием рабочего колеса с потоком воздуха и обратной связи с параметрами внешней сети через полость высокого давления корпуса вентилятора [3–5].

Параметры вихревой дорожки Кармана, формирующейся вокруг профиля лопатки под воздействием источников, определяют аэродинамическую адаптивность вентиляторных установок аппарата воздушного охлаждения и не только являются функцией геометрических параметров канала и профилей лопаток, но и зависят от ее обратной связи с характеристиками внешней сети, что способствует росту адаптивности турбомашин.

В отечественной и зарубежной литературе недостаточно данных по исследованиям энергетического управления обтеканием лопаток рабочих колес турбомашин, учитывающих обратную связь зависимости параметров вихревой системы, формирующейся вокруг профилей, от характеристик внешней сети.

Аэродинамические характеристики вентиляторных установок воздушного охлаждения влияют на их аэродинамическую адаптивность и экономичность.

Наиболее перспективным средством повышения эффективности вентиляторных установок воздушного охлаждения является применение метода энергетического управления течением в их проточной части.

Для энергетического управления аэродинамикой вентиляторных установок воздушного охлаждения наибольший интерес представляют радиальные турбомашины, в которых используются решетки профилей с аэрогазодинамическими особенностями, в частности с аэродинамическими источниками, формирующими управляющий поток. Они отличаются простотой конструктивного исполнения, обеспечивают повышение аэродинамической адаптивности и экономичности вентиляторных установок воздушного охлаждения и, как результат, потенциально широкую область их применения [5].

Методы исследований. Вентиляторная установка воздушного охлаждения с аэрогазодинамическими особенностями позволяет реализовать энергетический метод управления течением в проточной части путем изменения циркуляции потока вокруг профилей лопаток рабочего колеса за счет энергетического взаимодействия управляющего потока источников с вихревой дорожкой Кармана.

Профиль лопатки рабочего колеса осевой вентиляторной установки аппарата воздушного охлаждения с энергетическим управлением ее обтекания с помощью источников в виде каналов, встроенных в нее, приведен на рис. 1.

Циркуляция потока вокруг решетки профилей лопаток рабочего колеса осевой вентиляторной установки аппарата воздушного охлаждения определяется положением передней критической точки ПКТ *3* и задней критической точки ЗКТ *4* [6].

Для плоской решетки аэрогазодинамических профилей с источником циркуляция определяется положением эффективной критической точки ЭКТ *5*, смещающейся по отношению к ЗКТ *4* под действием источника, изменяющего вихревую дорожку Кармана [7–9].

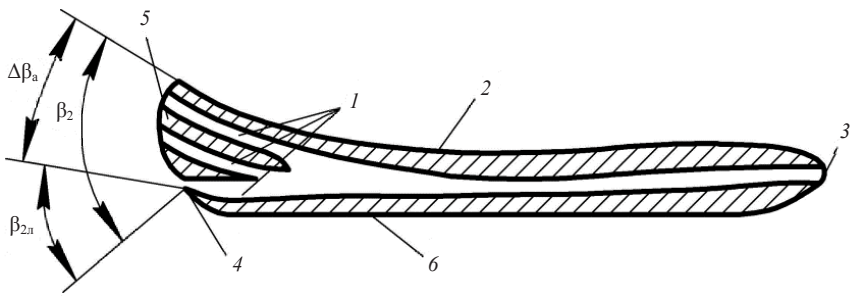

Рис. 1. Профиль аэрогазодинамической лопатки рабочего колеса с источником-стоком:
1 – каналы источников; *2* – рабочая поверхность профиля лопатки; *3* – передняя критическая точка; *4* – задняя критическая точка; *5* – эффективная критическая точка; *6* – тыльная поверхность профиля лопатки
Fig. 1. Profile of an air-gas dynamic impeller blade with a source-sink:
1 – source channels; *2* – the working surface of the blade profile; *3* – forward critical point; *4* – rear critical point; *5* – effective critical point; *6* – back surface of the blade profile

Энергия источников формируется за счет потоков, поступающих из-за перепада давления между передней *3* и задней *4* критическими точками лопаток, и центробежной силы от их вращения, перемещающей часть потока от торцевой кромки лопатки до его периферии через каналы *1* в профиле лопатки, обеспечивая за счет их воздействия на поток, обтекающий профиль лопатки, изменение вихревой дорожки Кармана и, как результат, смещение ЗКТ *4* в положение ЭКТ *5*, т. е. рост циркуляции вокруг профиля плоской решетки [5, 9].

Взаимодействие управляющего потока источника с основным потоком, обтекающим аэрогазодинамический профиль лопатки под углом ее выхода из рабочего колеса $\beta_{2л}$, обеспечивает существенное увеличение угла поворота потока на угол $\Delta\beta_а$, т. е. смещение в направлении вращения рабочего колеса точки полного торможения потока, соответствующей положению ЗКТ *4* и определяемой углом $\beta_{2л}$ в положении ЭКТ *5*, т. е. точки фактического полного торможения потока, определяемой углом β_2. Указанное приводит к увеличению циркуляции потока в межлопаточных каналах рабочего колеса и, как результат, к росту аэродинамической адаптивности [5, 6, 10].

Выполнение выходной кромки аэродинамического профиля лопатки между ЗКТ *4* и ЭКТ *5* плавно скругленной позволяет, управляя циркуляцией с помощью расположенных на ней источников, устранять отрывное вихреобразование, т. е. разрыв вихревой дорожки Кармана, а значит повышать адаптивность осевой вентиляторной установки аппарата воздушного охлаждения.

Приведенные исследования физически подтверждают достоверность гипотезы о доминирующем влиянии положения ЗКТ *4* на циркуляцию потока вокруг

профиля лопатки рабочего колеса вентиляторной установки воздушного охлаждения и разрыв вихревой дорожки Кармана, т. е. отрывное вихреобразование, определяющее адаптивность.

Плавное совмещение точки отрыва потока с ЭКТ *5* за счет энергии источников, воздействующей на вихревую дорожку Кармана в области ЗКТ *4*, обеспечивает повышение аэродинамической адаптивности осевой вентиляторной установки аппарата воздушного охлаждения.

Таким образом, в плоской решетке аэрогазодинамических профилей за счет интенсивности источников можно обеспечивать плавное обтекание выходной кромки и смещение ЗКТ *4* профилей, соответствующих точке отрыва в ЭКТ *5* и, как результат, плавное изменение угла выхода потока β_2 из плоской решетки.

В статье предложена математическая модель, устанавливающая связь положения ЭКТ *5* профиля лопаток рабочего колеса с энергетическими характеристиками источников, позволяющая оценить эффективность активного метода управления аэродинамическими характеристиками вентиляторных установок воздушного охлаждения и построить алгоритмы их конструирования.

На рис. 2 приведена графическая модель конформного преобразования положения *j*-источников в выходной части аэрогазодинамического профиля лопаток рабочего колеса турбомашины на концентрические круги многолистной римановой области S_r [11].

Учитывая, что на границах каналов источника $\theta^j_{и1}$ потоки движутся в направлении, противоположном основному потоку, на круге возникают критические точки, определяемые координатами $\theta^j_{kи}$, в которых скорость потока вихревой дорожки Кармана равна 0 [6, 11–13].

Таким образом, на *j*-й окружности в области S_1 формируется 2*j* критических точек, в которых скорость основного потока равна 0: передняя критическая точка θ^j_1, задняя критическая точка θ^j_3, критическая точка, обусловленная наличием стока θ^j_{kc}, критическая точка, обусловленная наличием источника $\theta^j_{kи}$.

В точках $\theta^j_{и1}$, $\theta^j_{и2}$ соответствующих границам канала источника, и в начале координат, где помещены источники, скорость суммарного потока стремится к бесконечности, поскольку они представляют собой гидродинамические особенности первого порядка.

Уравнение для определения скорости обтекания *j*-го круга радиусом $l_j \geq 1$ в области S_1 с учетом метода особенностей С. А. Чаплыгина, интеграла Коши, теории вычетов, получим в виде:

$$\frac{dP_j}{dr_j} = ql_j \exp(-i\theta^j_3)\frac{(\exp(i\theta^j) - \exp(i\theta^j_4))(\exp(i\theta) - \exp(i\theta^j_{kи}))(\exp(i\theta^j) - \exp(i\theta^j_1))}{\exp(2i\theta^j)\sqrt{(\exp(i\theta) - \exp(i\theta^j_{и1}))(\exp(i\theta) - \exp(i\theta^j_{и2}))}}, \quad (1)$$

где P_j – комплексный потенциал в плоскости *j*-го круга радиусом $l_j \geq 1$; $r_j = l_j \exp(i\theta^j)$ – комплексные координаты точек в области S_r; $r_j = t^j_\gamma$ на окружностях радиусами l_j; γ – условное обозначение стока, источника, критических точек.

После соответствующих преобразований угол вектора скорости, определяющий положение ЭКТ, рассчитаем по формуле:

$$\bar{\theta}^j = \theta^j_3 - 0,5\theta^j_4 - 0,5\theta^j_{kи} + \theta^j + 0,25\theta^j_{и1} + 0,25\theta^j_{и2}, \quad (2)$$

где $\bar{\theta}^j = \theta^j - \pi/2$.

Получим уравнение для угла положения ЭКТ на круге единичного радиуса в области S_1:

$$\theta_4^j = \theta_3^j - \theta_{kи}^j + \theta_и^j = \theta_3^j + \Delta\theta_{3q}^j, \tag{3}$$

где $\theta_и^j = 0,5\theta_{и1}^j + 0,5\theta_{и2}^j = \left|\theta_q^j\right|$ – угол, определяющий положение середины каналов источника; $\Delta\theta_{3q}^j = 2(\theta_q^j - \theta_{kq}^j)$ – угол смещения ЗКТ от действия источника.

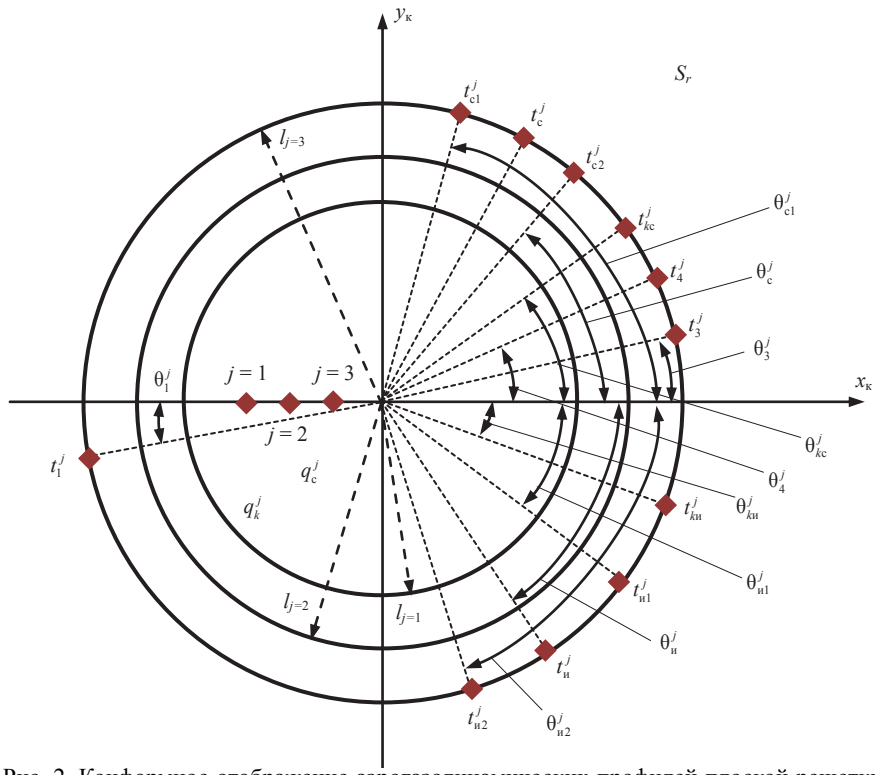

Рис. 2. Конформное отображение аэрогазодинамических профилей плоской решетки на концентрические окружности:
$t_{и1}^j$, $t_{и2}^j$ – координаты границ каналов источника; $\theta_{и1}^j$, $\theta_{и2}^j$ – углы, определяющие координаты положения границ каналов источника; l_j – радиус-вектор положения координат канала источника; $q_и^j$ – энергетические характеристики источника

Fig. 2. Conformal mapping of air-gas-dynamic profiles of a flat lattice onto concentric circles:
$t_{и1}^j$, $t_{и2}^j$ – coordinates of the source channels boundaries; $\theta_{и1}^j$, $\theta_{и2}^j$ – the angles defining the coordinates of source channels boundaries; l_j – the radius vector of the source channel coordinates position; $q_и^j$ – energy characteristics of the source

Угол смещения $\Delta\theta_{3q}^j$ положения ЗКТ, определяемого углом θ_3^j, в положение ЭКТ, определяемое углом θ_4^j, от действия источника определяет прирост циркуляции, т. е. увеличивает угол β_2 на величину $\Delta\beta_а$ и, как результат, повышает аэродинамическую адаптивность осевой вентиляторной установки аппарата воздушного охлаждения [14, 15].

В соответствии с интегралом Коши и теорией вычетов

$$\int_{l_j=1}^{S_r} \frac{dP_j}{dr_j} dr_j = \rho^j - i + q_и^j, \tag{4}$$

где ρ^j – циркуляция вокруг окружности радиусом $l^j = 1$ в области S_1 без источников.

Результаты моделирования и их обсуждение. С учетом уравнений (2)–(4) получим формулы для расчета интенсивности источника $q_{\text{и}}^{j}$ и дополнительной циркуляции $\rho_{q\text{в}}^{j}$, возникающей вокруг окружности единичного радиуса в области S_1 от воздействия источника на вихревую дорожку Кармана:

$$q_{\text{и}}^{j} = 2\pi q[\cos\Delta\theta_{3q}^{j} - \theta_{q1}^{j})\cos(\theta_3^{j} - \theta_{q2}^{j}) - \cos\theta_3^{j} - \cos(\theta_3^{j} - \theta_4^{j}) - \cos(\theta_3^{j} - \theta_{kq}^{j})];$$

$$\rho_{q\text{в}}^{j} = 2\pi q[\sin(\theta_3^{j} - \theta_{q1}^{j}) + \sin(\theta_3^{j} - \theta_{q2}^{j}) - \sin(\theta_{3\rho}^{j} - \theta_{kq}^{j})] + 4\pi q\sin\theta_3^{j}. \quad (5)$$

При этом интенсивность источника $q_{\text{и}}^{j}$ и циркуляция $\rho_{q\text{в}}^{j}$ связаны с параметрами перекачиваемой рабочей среды (воздуха) соотношениями $q_{\text{и}}^{j} = 4\Delta^{j}/\pi d^2$, $\rho_{\text{и}}^{j} = \Delta^{j}P/\rho^2$, где d, q, P – диаметр, м, подача, м^3/с, давление рабочего колеса вентиляторной установки, Па; ρ – плотность рабочей среды (воздуха), кг/м^3.

Используя уравнение для расчета θ_4^{j} (3), произведя необходимые преобразования уравнений (5), принимая ширину каналов источника ничтожно малой, формулу для расчета положения ЭКТ профиля на круге единичного радиуса в области S получим в форме:

$$\theta_4^{j} = 0,5\theta_3^{j} + \theta_q^{j} + \arcsin\left(\frac{q_q^{j}}{2\pi q\sin 0,5\theta_q^{j}} - \sin(0,5\theta_q^{j} - \theta_3^{j})\right). \quad (6)$$

Формулы (5), (6) математически подтверждают достоверность предложенной гипотезы. Управление интенсивностью источников позволяет смещать ЗКТ профиля плоской решетки в положение ЭКТ в широком диапазоне аэродинамических параметров, тем самым повышать взаимозависимость вентиляторной установки от изменения температуры охлаждения газа и охлаждения воздуха.

С использованием предложенной математической модели разработана аэродинамическая схема ОВ 121ТН. Испытания опытного образца вентиляторной установки ОГМ.ВУ2,7-1,8К4 в сертифицированной лаборатории «СМК-тест» подтвердили повышение аэродинамической адаптивности на 34 %.

Выводы. Для повышения энергоэффективности турбомашин выходная кромка аэрогазодинамического профиля лопаток их рабочих колес должна быть плавно скруглена с расположением в ней источников управления потоком.

Целенаправленное управление параметрами интенсивности источников на выходном участке аэрогазодинамического профиля лопаток рабочего колеса способствует повышению аэродинамической адаптивности вентиляторных установок аппарата воздушного охлаждения за счет управления положением ЭКТ.

Аэродинамическая схема ОВ 121ТН повышает аэродинамическую адаптивность вентиляторной установки ОГМ.ВУ2,7-1,8К4 на 34 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров В. Н., Леонтьев Е. В. Генезис проветривания газообильных угольных шахт и оценка эффективности средств ее реализации // ГИАБ. 2014. № 1. С. 246–252.

2. Косарев Н. П., Макаров В. Н. Генезис эффективности проветривания // Известия вузов. Горный журнал. 2012. № 1. С. 22–26.

3. Таугер В. М., Лифанов А. В., Макаров Н. В., Макаров В. Н. Модификация математической модели напряженного состояния лопаток быстроходных осевых вентиляторов для горной промышленности // ГИАБ. 2019. № 10. С. 206–213. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-206-213

4. Макаров Н. В., Макаров В. Н., Патракеева И. Ю. Специфика эксплуатации и этапы совершенствования вентиляторов местного проветривания // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 6. С. 74–79.

5. Способ повышения давления и экономичности лопастных турбомашин: пат. 2482337 C1 Рос. Федерация. № 2011148542/06; заявл. 29.11.2011; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 14.

6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

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

8. Mao Y. F. Numerical study of correlation between the surge of centrifugal compressor and the piping system: PhD thesis. Xian Jiaotong University, Xian. 2016. (In Chinese).

9. Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M. Numerical optimization and manufacturing of the impeller of a centrifugal compressor by variation of splitter blades // ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Seoul, 13–17 June 2016. P. 1–7.

10. Wang P. Multi-objective design of a transonic turbocharger compressor with reduced noise and increased efficiency: PhD thesis. UCL University, London. 2017. 213 p.

11. Гостелоу Д. Ж. Аэродинамика решеток турбомашин. М.: Мир, 1987. 391 с.

12. Способ создания подъемной силы и устройства для его осуществления: пат. 2601495 Рос. Федерация. № М.кл.B64C23/0,6; заявл. 22.06.2015; опубл. 11.10.2016. Бюл. № 31.

13. Bautin S. G., Krutova I. Y., Obukhov A. G. Twisting of a fire vortex subject to gravity and Coriolis forces // High temperature. 2015. Vol. 53. No. 6. P. 928–930. DOI: 10.1134/S0018151X1505003X

14. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control // Applied Sciences (Switzerland). 2017. Vol. 7. No. 1. P. 5–20. DOI: 10.3390/app7010005

15. Novakovskiy N. S., Bautin S. P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 894. No. 1. P. 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012067

Поступила в редакцию 10 апреля 2021 года

Сведения об авторах:

Макаров Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: uk.intelnedra@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3785-5569

Макаров Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: mnikolay84@mail.ru; https://orcid.org/000-0001-7039-6272

Молчанов Максим Владимирович – начальник отдела горной механики Научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр». E-mail: umbr@umbr.ru; https://orcid.org/0000-0003-1909-6578

Угольников Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники Уральского государственного горного университета. E-mail: ugolnikov@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8442-4841

Бельских Анна Михайловна – студентка кафедры горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: belskikh-2015@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-92-100

Method of effective circulation control of high speed fans impellors

Vladimir N. Makarov[1], Nikolai V. Makarov[1], Maksim V. Molchanov[2], Aleksandr V. Ugolnikov[1], Anna M. Belskikh[1]

[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

[2] JSC "Uralmekhamobr", Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research relevance. *The high-level competitiveness of Russian oil and gas sector enterprises in the global economic space is impossible to reach without accelerating the restructuring of existing air-cooling apparatuses and developing new ones. It should be carried out with regard to modern technology introduction and advanced achievements in mining. The cost of gas cooling during its transportation via main gas pipelines in the cost structure reaches 22%. Besides, annual energy wastage on compressed gas cooling by fan installations is commensurate with the cost of the air cooling devices. It is essential to develop active means of air conditioning units control in order to improve their efficiency and aerodynamic adaptability that affect the competitiveness of oil and gas enterprises.*

Research aim *is to develop a mathematical model for fan unit parameters active control.*
Research methods *are based on the experimentally proven hypothesis about the dependence between the control flow rate on the impeller blades and the position of the rear critical points of the blades.*
Research results. *A method was developed based on conformal transformations, the theory of residues, singular equations, and hydrodynamic analogy. The dependence between the position of the profiles critical points and flow circulation was obtained. The dependence of the aerodynamic adaptability of the fan units in air conditioning devices on effective critical point position and the energy characteristics of the impeller blades flow controlling source has been established. A patent was obtained for the fan unit impeller with active circulation control from air flow sources from the fan casing. High efficiency of the developed circulation control method for increasing the operational efficiency and aerodynamic adaptability of air-cooled fan units has been proved. An aerodynamic scheme of OV 121TN was developed. A fan unit OGM VU2.7-1.8K4 with aerodynamic adaptability increased by 34% was created.*

Keywords: *fan unit; circulation; source; aerodynamic adaptability; profiles cascade; conformal transformation.*

REFERENCES

1. Makarov V. N., Leontiev E. V. Genesis airing gassy coal mines and evaluation of effectiveness of its implementation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 1: 246–252. (In Russ.)

2. Kosarev N. P., Makarov V. N. Genesis of airing effectiveness. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2012; 1: 22–26. (In Russ.)

3. Tauger V. M., Lifanov A. V., Makarov N. V., Makarov V. N. Mathematical model modification for stress state of high-speed axial fan blades in mining industry. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 10: 206–213. Available from: DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-206-213 (In Russ.)

4. Makarov N. V., Makarov V. N., Patrakeeva I. Iu. Specific character of exploitation and update stages of local ventilation fans. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016; 6: 74–79. (In Russ.)

5. Kosarev N. P., Makarov N. V., Makarov V. N. *Method for increasing pressure and economy of bladed radial turbomachines*. Patent RF no. 2482337; 2013. (In Russ.)

6. Loitsianskii L. G. *Mechanics of fluids*. Moscow: Drofa Publishing; 2003. (In Russ.)

7. Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M. Multilevel optimization of the splitter blade profile in the impeller of a centrifugal compressor. *Scientia Iranica*. 2017; 24: 707–714.

8. Mao Y. F. *Numerical study of correlation between the surge of centrifugal compressor and the piping system: PhD thesis*. Xian Jiaotong University, Xian. 2016. (In Chinese).

9. Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M. Numerical optimization and manufacturing of the impeller of a centrifugal compressor by variation of splitter blades. In: *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Seoul, 13–17 June 2016*. P. 1–7.

10. Wang P. *Multi-objective design of a transonic turbocharger compressor with reduced noise and increased efficiency: PhD thesis*. UCL University, London. 2017. 213 p.

11. Gostelow J. P. *Cascade aerodynamics*. Moscow: Mir Publishing; 1987. (In Russ.)

12. Makarov N. V., Makarov V. N. *Method of lift force creation and device for its implementation*. Patent RF no. 2601495; 2016. (In Russ.)

13. Bautin S. G., Krutova I. Y., Obukhov A. G. Twisting of a fire vortex subject to gravity and Coriolis forces. *High temperature*. 2015; 53(6): 928–930. Available from: DOI: 10.1134/S0018151X1505003X

14. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2017; 7(1): 5–20. Available from: DOI: 10.3390/app7010005

15. Novakovskii N. S., Bautin S. P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017; 894(1): 012067. Available from: DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012067

Received 10 April 2021

Information about authors:

Vladimir N. Makarov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Rock Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: uk.intelnedra@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3785-5569
Nikolai V. Makarov – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Rock Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: mnikolay84@mail.ru; https://orcid.org/000-0001-7039-6272

Maksim V. Molchanov – Head of the Department of Rock Mechanics, JSC "Uralmekhamobr". E-mail: umbr@umbr.ru; https://orcid.org/0000-0003-1909-6578
Aleksandr V. Ugolnikov – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, Ural State Mining University. E-mail: ugolnikov@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8442-4841
Anna M. Belskikh – student, Department of Rock Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: belskikh-2015@mail.ru

Для цитирования: 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
For citation: Makarov V. N., Makarov N. V., Molchanov M. V., Ugolnikov A. V., Belskikh A. M. Method of effective circulation control of high speed fans impellors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 4: 92–100 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-92-100