

**В.Н. Макаров, Н.А. Горшкова, И.А. Волежжанин**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИКОЙ ШАХТНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ**

Предложен способ активного управления аэродинамическими характеристиками центробежных турбомашин. На базе гидродинамической аналогии математического аппарата камфорных преобразований построена модель зависимости давления, развиваемого круговой решеткой профилей с вихреисточниками от энергетических характеристик формирующих его вихревых камер. Показана высокая эффективность применения активных методов управления аэродинамикой для повышения эксплуатационной экономичности аэродинамической нагруженности и устойчивости шахтных центробежных вентиляторов.

Ключевые слова: вентилятор, циркуляция, вихревая камера, аэродинамическая схема, вихреисточник, круговая решетка профилей.

**А**эродинамика шахтных центробежных вентиляторов определяет их адаптивность и аэродинамическую нагруженность, обеспечивающие широкий диапазон вентиляционных режимов, обусловленный интенсификацией угледобычи, ростом длины и усложнением топологии систем вентиляции [2].

Для активного управления аэродинамикой наибольший интерес представляют центробежные вентиляторы, в которых используются круговые решетки профилей с вихревыми камерами. Они отличаются простотой конструктивного исполнения, обеспечивают надежность и ремонтпригодность вентиляторов, повышение их аэродинамической нагруженности, экономичности и, как результат, потенциально широкую область их применения [7].

В соответствии с теорией вычетов при потенциальном обтекании неограниченным потоком круговой решетки бесконечно тонких профилей их задняя критическая точка (ЗКТ) перестает быть точкой ветвления потока и угловой точкой при располо-

жении в ней вихреисточника, то есть имеет место ее плавное [5].

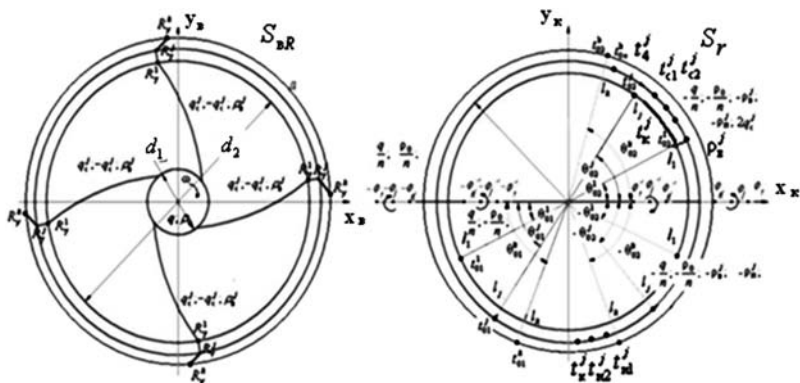
Таким образом, в круговой решетке профилей при изменении циркуляции вихреисточников профилей, происходит смещение ЗКТ в эффективную критическую точку ЭКТ и как результат изменение угла выхода потока  $\beta_2$  из круговой решетки.

По мере увеличения циркуляции вихреисточника происходит поворот потока на выходе из круговой решетки профилей в направлении ее вращения, что в соответствии с уравнением Эйлера приводит к росту коэффициента теоретического давления  $\psi_{та}$  по сравнению с  $\psi_{т}$ , для классической решетки соответствующего углу выхода  $\beta_{2л}$  телесного теоретического профиля круговой решетки, то есть ведет к возникновению режима суперциркуляции [4].

В данной работе исследована причинно-следственная связь  $\psi_{та}$  круговой решетки профилей с вихреисточниками и их энергетических характеристик.

Изучение этого явления дает возможность оценить эффективность активного управления аэродинамическими характеристиками вентиляторов и построить алгоритмы их конструирования на основе предложенной математической модели.

Метод гидродинамической аналогии, математический аппарат конформных преобразований позволяют установить взаимозависимость энергетических параметров вихреисточников и  $\psi_{та}$  круговой решетки профилей с учетом того, что они могут быть представлены в виде отрезков логарифмических спиралей [1].



Принципиальная схема конформного отображения: а) круговая решетка профилей в виде отрезков логарифмических спиралей; б) конформное отображение логарифмических спиралей на concentрические окружности

Геометрическая интерпретация расположения адаптивных вихреисточников на круге единичного радиуса области  $S_r$  с конформным отображением профилей круговой решетки, представленных тремя отрезками логарифмических спиралей приведена на рисунке.

Отличительные особенности адаптивного вихреисточника:

- кинематически адаптивный вихреисточник формируется за счет тангенциального входа части основного потока из межлопаточного канала круговой решетки профилей в канал стока, с помощью чего он закручивается, приобретая кинетическую энергию, соответствующую интенсивности вихря. При этом, в зависимости от направления канала стока, вращение вихря может организовываться как в направлении вращения круговой решетки профилей, так и противоположном направлении;
- источники адаптивного вихреисточника кинематически формируются за счет системы каналов источника, выходящих попарно на тыльную и рабочую линии профиля. При этом суммарный расход источников на тыльную поверхность равен расходу на рабочую поверхность, то есть каждый из них половину интенсивности стока адаптивного вихреисточника;
- источники, расположенные на линии профиля в месте расположения стока, находятся в непосредственной близости от входного канала стока, образуя с ним замкнутую систему: источник – сток. То есть в условиях адаптивного вихреисточника в месте расположения стока с интенсивностью  $q_c^j$  и источника с интенсивностью  $0,5q_u^j = -0,5q_c^j$  будет иметь место только сток с интенсивностью  $0,5q_c^j$ .

Модель представленного на рисунке физического явления характеризуется наличием входного канала стока адаптивного вихреисточника, определяемого координатами  $\theta_{c1}^j, \theta_{c2}^j$ , и характеризующегося интенсивностью отсоса стока  $q_c^j$  выходного каналом источника адаптивного вихреисточника, определяемого координатами  $\theta_{u1}^j, \theta_{u2}^j$ , и характеризующегося интенсивностью расхода источника  $q_u^j$ , а также вихря с интенсивностью циркуляции  $\rho_\sigma^j$ , расположенного в задней геометрической точке кучно-гладкого профиля  $\theta_3^j$  [3–6].

Физически это означает, что внутри  $j$ -го круга, изображенного на рисунке области  $S_r$  расположены сток и источник, равной интенсивности в силу характеристических особенностей адаптивного вихреисточника, указанных выше. При этом, в бесконечности на области  $S_r$  расположены соответственно источник и сток той же интенсивности. Часть воздуха из основного пото-

ка, обтекающего  $j$ -ый круг поступает во внутрь вышеуказанного круга через входной канал стока, при этом вытекает в том же количестве через два выходных канала источников адаптивно-вихреисточника, расположенных сопряженно относительно задней критической точки  $\theta_3^j$ .

Учитывая, что в месте расположения стенок входного и выходного каналов стока  $\theta_{c2}^j$  и источника  $\theta_{u1}^j$  втекающий и вытекающий потоки движутся в направлении противоположном основному потоку, на круге возникают две критические точки, определяемые координатами  $\theta_{kc}^j$ ,  $\theta_{ku}^j$ , в которых скорость основного потока равна 0.

Таким образом, на  $j$ -ой окружности в области  $S_r$  формируются четыре критических точки, то есть точки на  $j$ -ом отрезке кусочно-гладкого профиля круговой решетки, в которых скорость основного потока равна 0: передняя критическая точка  $\theta_1^j$ , задняя критическая точка  $\theta_3^j$ , критическая точка, обусловленная наличием стока адаптивного вихреисточника  $\theta_{kc}^j$ , критическая точка, обусловленная наличием источника адаптивного вихреисточника  $\theta_{ku}^j$ . Наличие в ЗКТ точке  $\theta_3^j$  вихря адаптивного вихреисточника с интенсивностью циркуляции  $\rho_\sigma^j$  индуцируют вокруг круга единичного радиуса в области  $S_r$  скорость равную  $\rho_\sigma^j/2\pi$ , способствующую смещению ЗКТ точки  $\theta_3^j$  в ЭКТ точку  $\theta_{3p}^j$ .

В точках, соответствующих границам входного канала стока  $\theta_{c1}^j$ ,  $\theta_{c2}^j$ , выходного канала источника  $\theta_{u1}^j$ ,  $\theta_{u2}^j$ , и в начале координат, где помещены сток и источник, скорость имеет бесконечное значение, поскольку они представляют собой гидродинамические особенности первого порядка.

Принимая  $r_j = 1$ , уравнение для определения скорости обтекания  $j$ -го круга радиуса  $l_j \geq 1$  в области  $S_r$  с учетом метода особенностей С.А. Чаплыгина, интеграла Коши, теории вычетов и получим следующем виде:

$$\frac{dP_j}{dr_j} = ql_j e^{-i(\theta_3^j + \Delta\theta_{3p}^j)} \frac{(e^{i\theta^j} - e^{i\theta_1^j})(e^{i\theta} - e^{i\theta_{ku}^j})(e^{i\theta} - e^{i\theta_{kc}^j})(e^{i\theta^j} - e^{i\theta_3^j})}{e^{2i\theta^j} \sqrt{(e^{i\theta^j} - e^{i\theta_{c1}^j})(e^{i\theta^j} - e^{i\theta_{c2}^j})(e^{i\theta} - e^{i\theta_{u1}^j})(e^{i\theta} - e^{i\theta_{u2}^j})}} \quad (1)$$

где  $P_j$  – комплексный потенциал в плоскости  $j$ -го круга радиуса  $l_j \geq 1$ ;  $r_j = l_j e^{i\theta^j}$  – комплексные координаты точек в области  $S_r$ ;  $r_j = t_i^j$  на окружностях радиусов  $l_j$ .

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

$$\bar{\theta}^j = \theta_3^j + \Delta\theta_{3p}^j - 0,5\theta_4^j - 0,5\theta_{kc}^j - 0,5\theta_{ku}^j + 0,25\theta_{c1}^j + \\ + 0,25\theta_{c2}^j + \theta^j + 0,25\theta_{u1}^j + 0,25\theta_{u2}^j, \quad (2)$$

при условии:  $\bar{\theta}^j = \theta^j - \frac{\pi}{2}$ .

Учитывая, что (2) позволяет рассчитать направление скорости в любой точке  $j$ -го круга единичного радиуса области  $S_r$  после соответствующих преобразований получим уравнения для расчета положения ЭКТ на круге единичного радиуса в области  $S_r$ :

$$\theta_4^j = \theta_3^j + \Delta\theta_{3p}^j - \theta_{ku}^j - \theta_{kc}^j + \theta_c^j + \theta_u^j = \theta_3^j + \Delta\theta_{3p}^j + \Delta\theta_{3q}^j, \quad (3)$$

где  $\theta_c^j = 0,5\theta_{c1}^j + 0,5\theta_{c2}^j = |\theta_u^j| = |\theta_q^j|$  – угол, определяющий положение середины входного и выходного каналов адаптивного вихреисточника;  $\Delta\theta_{3q}^j = 2(\theta_c^j - \theta_{kq}^j)$  – угол смещения ЗКТ, от действия стока и источника;  $\theta_{kq}^j = \theta_{kc}^j = |\theta_u^j|$ .

Угол смещения ( $\Delta\theta_{3p}^j + \Delta\theta_{3q}^j$ ) определяет прирост циркуляции, т.е. принимая для простоты расчетов  $\psi_{та}$  круговой решетки профилей с вихреисточниками.

В соответствии с интегралом Каши и теорией вычетов

$$\int_{S_r, l_j=1} \frac{dP_j}{dr_j} dr_j = \rho^j + \rho_{\sigma}^j - i(q_c^j + q_u^j), \quad (4)$$

где  $\rho_j$  – циркуляция вокруг окружности радиуса  $l_j = 1$  в области  $S_r$  без вихреисточника.

С учетом уравнений (3), (4) получим формулы для расчета интенсивности стока  $q_c^j$  и источника  $q_u^j$  адаптивного вихреисточника и дополнительной циркуляции  $\rho_{\sigma}^j$ , возникающей вокруг окружности единичного радиуса в области  $S_r$  от воздействия стока, источника и вихря адаптивного вихреисточника на основной поток:

$$q_c^j = -q_u^j |q_q^j| = 2\pi q [\cos\Delta\theta_q^j - \theta_{q1}^j) \cos(\theta_3^j - \theta_{q2}^j) - \\ - \cos\theta_3^j - \cos(\theta_3^j - \theta_4^j) - \cos(\theta_3^j - \theta_{kq}^j)] \\ \rho_{\sigma}^j = 2\pi q [\sin(\theta_{3p}^j - \theta_{q1}^j) + \sin(\theta_{3p}^j - \theta_{q2}^j) - \\ - \sin\theta_{3p}^j - \sin(\theta_{3p}^j - \theta_4^j) - \sin(\theta_{3p}^j - \theta_{kq}^j)] + 4\pi q \sin\theta_3^j, \quad (5)$$

Используя уравнение для расчета  $\theta_4^j$  (3), произведя необходимые преобразования уравнений (5), принимая ширину входного и выходного каналов адаптивного вихреисточника нич-

тожно малой, получим формулу для расчета положения ЭКТ профиля на круге единичного радиуса в области  $S_r$ :

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

Анализ формул (5), (6) позволяет сделать вывод о высокой эффективности влияния адаптивных вихреисточников на аэродинамическую характеристику круговых решеток кусочно-гладких профилей. Совместное воздействие источника и стока в сочетании с существенным влиянием вихря адаптивного вихреисточника позволяют смещать ЭКТ профиля круговой решетки в широком диапазоне, то есть геометрически не изменяя кривизну профилей, увеличивать  $\psi_{\text{та}}$  циркуляцию потока вокруг круговой решетки.

### Выводы

1. Параметры адаптивных вихреисточников, расположенных в угловых точках круговых решеток кусочно-гладких профилей влияют на положение их ЭКТ.
2. Аэродинамическая характеристика, адаптивность и экономичность вентиляторов, создаваемых на базе круговых решеток кусочно-гладких профилей с адаптивными вихреисточниками зависят от параметров их параметров.
3. Целенаправленное управление параметрами адаптивных вихреисточников в лопатках рабочих колес вентиляторов способствует повышению их функциональной и экономической эффективности.
4. При заданной интенсивности истока вихреисточника, уменьшение ширины выходного канал, то есть увеличение скорости истечения стока дает больший эффект увеличения  $\psi_{\text{та}}$ .
5. Дополнительная циркуляция, создаваемая вихреисточником, позволяет использовать предложенный способ увеличения перепада давления для разработки конструкции гидродинамических форсунок эффективного пылеподавления. Способствуя эффективному разряжению в области между вращающейся каплей жидкости, вытекающей из гидродинамической форсунки и частицы пыли это повышает эффективность не только захвата, но и поглощения ее при значительно меньших энергетических уровнях, т.е. способствуя уменьшению эффективного угла

смачиваемости. Это наиболее целесообразно для обеспыливающей среды по химическому составу, отличающихся слабыми адгезионными свойствами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Косарев Н. П., Макаров В. Н.* Математические модели аэродинамики вращающихся круговых решеток аналитических профилей произвольной формы со струйным управлением циркуляцией. Научное издание. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. – 93 с.

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

3. *Макаров В. Н., Горбунов С. А., Корнилова Т. А.* Перспективное направление повышения эффективности вентиляторов местного проветривания // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 124–129.

4. *Макаров В. Н., Горбунов С. А.* Радиально-вихревые прямоточные вентиляторы местного проветривания. Особенности идеальной аэродинамической характеристики / Материалы Уральской горнопромышленной декады. – Екатеринбург, 2013. – С. 386–387.

5. *Макаров В. Н., Косарев Н. П.* Расчет идеальной характеристики центробежного вентилятора с аэрогазодинамическими профилями // Горный вестник Узбекистана. – 2012. – № 4. – С. 101–104.

6. *Макаров В. Н., Макаров В. Н., Леонтьев Е. В.* Особенности расчета радиально-вихревых вентиляторов местного проветривания // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 127–132.

7. *Косарев Н. В., Макаров В. Н., Макаров Н. В.* Патент 2543638 Кл.Ф 04 D 29/28. Способ повышения давления и экономичности лопастных турбомашин радиального типа, опубл. 10.03.2015 г. Бюл. № 7. **ПАТ**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Макаров Владимир Николаевич*<sup>1</sup> – доктор технических наук, профессор, начальник управления инноватики и развития, e-mail: mnikolay84@mail.ru,

*Горшкова Наталья Александровна*<sup>1</sup> – менеджер ИДПО, e-mail: Np37@mail.ru,

*Волгезханин Иван Александрович*<sup>1</sup> – аспирант, e-mail: Volegzhanin.philips@mail.ru,

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 4, pp. 39–46.

UDC 622.44

**V.N. Makarov, N.A. Gorshkova, I.A. Volegzhanin**

#### **MATHEMATICAL MODELING OF ACTIVE CONTROL OF THE AERODYNAMICS OF SHAFT OF CENTRIFUGAL FANS**

A method of active control of aerodynamic characteristics of centrifugal turbomachines. On the basis of hydrodynamic analogy of the mathematical apparatus camphor transformations built a model of dependence of the pressure developed circular grating profiles with

variationally from the energy characteristics of the forming vortex chambers. Shown high efficiency of application of active methods of control aerodynamics to improve operational efficiency aerodynamic loading and stability of centrifugal mine fan.

Key words: fan, circulation vortex chamber, aerodynamic configuration, the vortex source, the circular grille profiles.

#### AUTHORS

*Makarov V.N.*<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of Innovation and Development Department, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com,  
*Gorshkova N.A.*<sup>1</sup>, Manager, e-mail:Np37@mail.ru,  
*Volegzhanin I.A.*<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: Volegzhanin.philips@mail.ru,  
<sup>1</sup> Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

#### REFERENCES

1. Kosarev N. P., Makarov V. N. *Matematicheskie modeli aerodinamiki vrashchayushchikh-sya krugovykh reshetok analiticheskikh profilye proizvol'noy formy so struynym upravleniem tsirkulyatsiey* (Mathematical models of aerodynamics of randomly shaped analytical rotating circular cascades with jet control ), Ekaterinburg, Izd-vo UGGU, 2005, 93 p.
2. Kosarev N. P., Makarov V. N. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2012, no 1, pp. 22–26.
3. Makarov V. N., Gorbunov S. A., Kornilova T. A. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2013, no 6, pp. 124–129.
4. Makarov N. V., Gorbunov S. A. *Materialy Ural'skoy gornopromyshlennoy dekady* (Ural Mining Industry Decade Proceedings), Ekaterinburg, 2013, pp. 386–387.
5. Makarov V. N., Kosarev N. P. *Gornyy vestnik Uzbekistana*. 2012, no 4, pp. 101–104.
6. Makarov V. N., Makarov N. V., Leont'ev E. V. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2012, no 2, pp. 127–132.
7. Kosarev N. V., Makarov V. N., Makarov N. V. *Patent RU 2543638 Kl.F 04 D 29/28*, 10.03.2015.



Участники «Недели горняка-2016»