

## **Управление локальной диффузорностью – эффективный способ повышения адаптивности вентиляторных установок аппаратов воздушного охлаждения газа**

**Макаров Н. В.<sup>1</sup>, Макаров В. Н.<sup>1</sup>, Угольников А. В.<sup>1\*</sup>,**

**Чураков Е. О.<sup>1</sup>, Арсланов А. А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

\*e-mail: ugolnikov@yandex.ru

### **Реферат**

**Постановка задачи.** Задачи повышения промышленной безопасности и эффективности охлаждения компримируемого газа на компрессорных станциях магистрального газопровода актуализируют проблему математического моделирования управления процессами преобразования энергии в рабочих колесах вентиляторных установок для аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа, отличающихся большой быстроходностью и адаптивностью для достижения требуемого уровня конкурентоспособности нефтегазового комплекса РФ в условиях глобализации.

**Цель.** Разработка метода управления локальной диффузорностью на профилях лопаток рабочих колес, являющейся основной причиной низкой адаптивности вентиляторных установок для АВО газа.

**Методика исследований.** Для расчета доминанты управления адаптивностью вентиляторных установок принят гидродинамический аналог локальной диффузорности – изменение скорости потока на профиле лопаток. С использованием конформных преобразований, гидродинамической аналогии, особых точек С. А. Чаплыгина разработан метод управления локальной диффузорностью путем изменения скорости потока с помощью источников влияния на обтекание профилей лопаток.

**Результаты.** Доказано, что доминантой управления локальной диффузорностью является интенсивность распределенных источников по профилю лопаток рабочего колеса вентиляторных установок для АВО газа, определяющих диффузорность потока и, как результат, изменение скорости вокруг профиля. Экспериментально подтверждено, что применение профилей, построенных с использованием предложенной методики, снижает коэффициент профильного сопротивления лопаток рабочих колес вентиляторных установок для АВО газа более чем в 3 раза, увеличивая область их экономичной работы не менее чем на 43 %.

**Область применения.** Полученный результат может быть использован на предприятиях нефтегазового комплекса РФ для охлаждения компримируемого газа с помощью АВО компрессорных станций магистральных газопроводов.

**Ключевые слова:** вентилятор; циркуляция; источник; адаптивность; решетка профилей; конформное преобразование.

**Введение.** Особенности транспортирования компримированного газа обусловлены существенными изменениями температурных условий окружающей среды [1, 2]. Указанные факторы ухудшают адаптивность вентиляторных установок для АВО газа, снижая конкурентоспособность предприятий. Повышение конкурентоспособности горных предприятий в сочетании с промышленной безопасностью актуализирует задачу разработки математических моделей управления механизмом преобразования энергии в рабочих колесах вентиляторных установок для АВО

газа [3]. Необходимы новые подходы к проектированию и созданию адаптивных вентиляторных установок для АВО газа, адекватно и одновременно экономически обоснованно создающих требуемые условия воздушной среды в технологическом пространстве, реализующих концепцию оптимальной экотехнологии недропользования [4].

В основе идеи природоподобия применительно к вентиляторным установкам для АВО газа лежит задача установления доминанты механизма взаимодействия лопаток рабочего колеса вентиляторных установок с потоком, управление которым позволяет адекватно, с минимальными потерями адаптироваться к изменяющимся параметрам технологического процесса охлаждения газа.

**Постановка задачи.** Взаимодействие потока воздуха с лопатками рабочего колеса вентиляторных установок для АВО газа осуществляется через устойчивую вихревую дорожку Кармана, формируемую системой присоединенных вихрей, являющуюся гидродинамическим аналогом профилей лопаток [5–7].

При изменениях температурных условий окружающей среды происходит деформация вихревой системы Кармана на профилях лопаток рабочих колес вентиляторных установок для АВО газа, снижение интенсивности присоединенных вихрей [8–10]. Локальная диффузорность, отрицательные градиенты скоростей, т. е. резкое замедление потока на профиле лопаток, приводят к росту потерь энергии на отрывное вихреобразование.

Обусловленное градиентом давления локальное замедление скорости более допустимой величины (отрицательное ускорение) приводят к торможению потока до скорости, равной 0, формированию точки отрыва потока, т. е. отрывному вихреобразованию.

Таким образом, значительное локальное замедление потока на профиле лопатки обуславливает даже в условиях потенциального течения его отрыв при доминирующем значении локальной диффузорности.

С учетом кинематических параметров на профиле локальную диффузорность и угол ее раскрытия получим в виде [11–13]:

$$\begin{aligned} \Delta_{\alpha} &= 1 - \frac{d\bar{V}}{\bar{V}} = 1 - \frac{d\bar{Q}}{\bar{V}}, \\ \alpha_{\alpha} &= -\operatorname{arctg} \frac{d\bar{V}}{dx} = -\arcsin \frac{d\bar{V}}{d\bar{S}} = \operatorname{arctg} \frac{d\bar{y}}{dx}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\bar{V}$  – относительная скорость потока воздуха на профиле лопатки,  $\bar{V} = V / u$ ;  $u$  – окружная скорость лопатки, м/с;  $d\bar{V}$  – снижение относительной скорости потока воздуха на профиле лопатки, обусловленное локальной диффузорностью;  $d\bar{Q}$  – снижение относительного расхода потока на профиле, обусловленное локальной диффузорностью;  $\bar{y}$  – относительная координата точек профиля лопатки в решетке рабочего колеса вентиляторных установок;  $\bar{y} = y / b$ ;  $b$  – хорда лопатки, м;  $\bar{x} = x / b$ ;  $\bar{S}$  – относительная длина профиля лопатки в точке с координатами  $(x, y)$ ;  $\bar{S} = S / b$ ;  $\bar{x} = x / b$ .

Таким образом, локальная диффузорность потока и угол ее раскрытия оказывают существенное влияние на механизм его энергетического взаимодействия с решеткой профилей, а главное – на формирование необратимых потерь энергии в рабочем колесе вентиляторных установок для АВО газа.

Для классических профилей лопаток рабочих колес вентиляторных установок для АВО газа существует внутреннее противоречие между увеличением градиента скорости для роста циркуляции, определяющего теоретическое давление, т. е. уровень энергетического взаимодействия до точки максимальной скорости, и обеспечением максимально допустимого замедления скорости, или отрицательного ускорения потока, отражающего гидродинамическую аналогию локальной диффузорности и угла ее раскрытия, при котором даже в условиях потенциального течения возникают возвратные течения потока до задней критической точки (ЗКТ) профиля лопаток рабочих колес.

Обладая высокой экономичностью и аэродинамической адаптивностью, на номинальном режиме вентиляторные установки для АВО газа резко снижают эффективность при изменении температурных условий окружающей среды в связи с изменением кинематических параметров потока на входе в рабочее колесо, что приводит к большим отрицательным ускорениям потока и отрывному вихреобразованию.

Для моделирования управления локальной диффузорностью в статье предложено принять ее в качестве критерия, определяющего соотношение между параметрами энергетического взаимодействия решетки профилей рабочего колеса с потоком и потерями энергии в нем, связанными с изменением кинематических параметров потока, обуславливающих изменение положения точки отрыва потока в связи с изменением диффузорности течения на профиле.

Таким образом, локальная диффузорность  $K_A$  и угол  $\alpha_A$  являются доминантами управления положением точек отрыва потока и ЗКТ в решетке профилей.

Согласно гипотезе Жуковского–Чаплыгина–Кутта циркуляция вокруг профиля, соответствующая энергетическому взаимодействию профиля с потоком, определяется положением ЗКТ. Как установлено ранее, положение точки отрыва потока по отношению к ЗКТ определяет потери энергии. Следовательно, необходимо найти способ управления локальной диффузорностью, позволяющий совмещать точку отрыва потока с ЗКТ при изменении температурных условий окружающей среды [12, 13].

Для устранения отрывного вихреобразования необходимо снижать локальную диффузорность потока на профиле, аналогично тому, как меняется форма крыла птицы для обеспечения плавного обтекания при изменении траектории полета. Однако на практике сложно реализовать идею профиля лопаток рабочего колеса вентиляторных установок для АВО газа изменяемой геометрии.

**Методология исследований.** Активные методы управления обтеканием лопаток рабочего колеса позволяют адекватно реализовать изменение геометрии профиля с помощью внешних источников и вихрей, формирующих «аэрогазодинамический профиль» переменной формы путем трансформирования линии тока.

Конструктивные особенности вентиляторных установок для АВО газа позволяют встроить в лопатки рабочих колес источники и вихревые камеры (рис. 1).

Источники 2 ( $i$  – количество источников,  $i = 1, 2, 3 \dots n$ ) управления обтеканием с интенсивностью расхода  $Q_i$ , аэродинамически связанные с параметрами технологического процесса, за счет воздействия на вихревую дорожку Кармана замедляют либо ускоряют скорость воздуха  $V_p, V_t$  на рабочей и тыльной поверхностях профиля лопатки 1, совмещая ЗКТ 3 и точку отрыва потока 4 в эффективной критической точке ЭКТ 5, изменяя его ускорение и, как результат, аэродинамическую характеристику вентиляторных установок для АВО газа адаптивно внешним условиям. Таким образом, скорость потока при входе на лопатку  $V_n$ , энергетические параметры присоединенных вихрей, смещение точки отрыва потока 4 и ЗКТ 3 в положение

ЭКТ 5, при котором обеспечивается безотрывное обтекание профиля, т. е. устранение отрывного вихреобразования на «аэрогазодинамических профилях», определяются характеристиками источниками управления обтеканием.

Учет обратной связи источников с внешними факторами при формировании математической модели аэродинамики вентиляторных установок для АВО газа до настоящего времени не применялся при проектировании и создании вентиляторных установок. В аэрогазодинамических профилях силовое взаимодействие лопаток

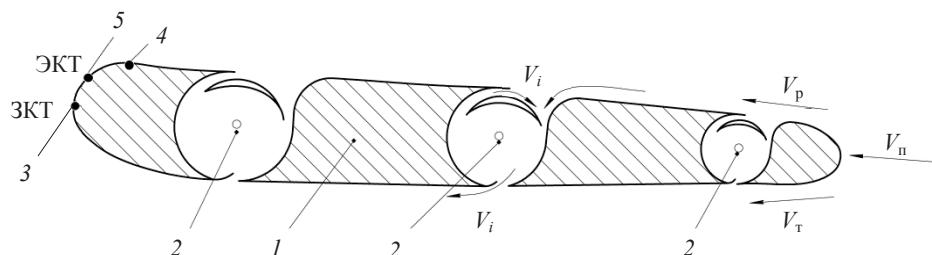


Рисунок 1. Аэрогазодинамический профиль лопатки рабочего колеса вентиляторных установок для АВО газа с устройством для устранения отрывного вихреобразования

Figure 1. Aerogasdodynamic profile of the GAC fan unit impeller blade with a device for eliminating separation vortex formation

рабочего колеса и потока происходит через адаптивную систему вихрей, устраниющих отрывное вихреобразование, обеспечивающих эффективность вентиляторных установок для АВО газа и их восприимчивость к изменениям температурных условий окружающей среды, аналогично тому, как крыло птицы во время полета «взаимодействует» с потоком воздуха. Подобно тому, как крыло птицы, изменяя свою форму при взаимодействии с потоком воздуха, обеспечивает эффективное безотрывное течение, система присоединенных вихрей, создаваемых источниками управления вихреобразованием «аэрогазодинамического профиля» лопаток рабочего колеса, управляемой локальной диффузорностью, устраняет отрывное вихреобразование. Спроектированные на базе данного принципа вентиляторные установки существенно расширяют диапазон изменения температурных условий окружающей среды, соответствующий энергоэффективным режимам их работы.

Вихревая дорожка Кармана характеризует одновременно степень энергетического взаимодействия решетки профилей с потоком и уровень потерь энергии в процессе этого взаимодействия. С точки зрения теории Гельмгольца, вихревая система формируется при потенциальном течении идеального газа [14].

Результат воздействия источников управления обтеканием на течение вокруг решетки профилей рабочего колеса вентиляторных установок для АВО газа имеет два принципиальных аспекта [12, 13, 15, 16]:

- управление циркуляционным обтеканием решетки профилей, которое способствует повышению ее аэродинамической адаптивности;
- управление отрывным вихреобразованием на поверхностях лопаток рабочего колеса, что способствует снижению потерь энергии и, как результат, повышению экономичности и адаптивности.

При разработке активных методов управления течением в решетках «аэрогазодинамических профилей» задача заключается в определении параметров источников, при которых достигается устранение отрывного вихреобразования, достижение циркуляции потока с минимально допустимой локальной диффузорностью, соответствующей потенциальному течению идеального газа.

Для разработки математической модели управления локальной диффузорностью в статье предложена научная гипотеза. Доминантой управления энергоэффективностью адаптивных вентиляторных установок для АВО газа, аэродинамическим качеством решеток профилей их рабочих колес является локальная диффузорность потока на профиле лопаток рабочего колеса при заданной циркуляции скорости.

Для адаптивных вентиляторных установок АВО газа с «аэрогазодинамическими профилями» лопаток рабочих колес с учетом (1) локальную диффузорность получим в виде:

$$\Delta_{\text{л}}^{\text{a}} = 1 - \frac{d\bar{Q} - d\bar{Q}_i}{\bar{V}} = 1 - \frac{\Delta\bar{Q}_i}{\bar{V}}, \quad (2)$$

где  $dQ_i$  – прирост относительного расхода воздуха от  $i$ -го источника управления обтеканием;  $\Delta\bar{Q}_i$  – изменение относительного расхода потока на профиле, обусловленное локальной диффузорностью и  $i$ -м источником с интенсивностью расхода воздуха  $\Delta\bar{Q}_i$ .

**Математическое моделирование.** Классическая теория круговых решеток профилей базируется на теории дискретных вихрей, использует теорию конформных преобразований, что не позволяет построить комплексный потенциал течения в решетке «аэрогазодинамических профилей» со встроенными источниками управления обтеканием, установить зависимость между аэродинамическими характеристиками, локальной диффузорностью потока и энергетическими параметрами источников.

Известные методы рассматривают теорию решетки профилей с конформным отображением однолистной римановой области на внешность многолистной канонической области либо изучают аэродинамику односвязного тела со струями с конформным отображением многолистной односвязной римановой области тела со струями на однолистную каноническую область. Кроме того, в научных источниках отсутствуют данные о математических моделях, учитывающих обратную связь зависимости энергетических характеристик присоединенных вихрей от непрерывно меняющихся внешних условий.

Использование базового принципа конформного преобразования для построения канонического потенциала течения для определения параметров локальной диффузорности приводит к конформному отображению многолистной римановой области круговой решетки аэрогазодинамических профилей с источниками управления обтеканием, энергетические характеристики которых являются функциями обратной связи с параметрами внешних условий, на многолистную каноническую область.

На рис. 2 изображены конформные преобразования решетки профилей с отображением их критических точек: преобразование круговой решетки профилей в области  $D_z$  на круговую решетку логарифмических спиралей в области  $D_{Bz}$  через область  $D_{By}$  для учета толщины  $C$  и кривизны  $\lambda$  профилей лопаток области  $D_z$ ; преобразование  $n_{\text{л}}$ -листной римановой области  $D_{By}$  на  $n_{\text{л}}$ -листную риманову область  $D_{\gamma}$  кругоединичного радиуса;  $\theta_i$  – полярный угол в плоскости  $D_{\gamma}$ , определяющий положение источников управления течением и критических точек профилей;  $\tau_{\text{ЗКТ}}, \tau_{\text{ЭКТ}}$  – координаты положения ЗКТ и ЭКТ профилей на круге единичного радиуса римановой  $n_{\text{л}}$ -листной области  $D_{\gamma}$ ;  $A_i$  – координата положения  $i$ -го источника управления обтеканием с интенсивностью расхода  $Q_i$  в области  $D_z$ ;  $\Gamma_{\text{зкт}}$  – интенсив-

ность вихря в задней критической точке профилей в области  $D_z$ ;  $\Gamma$  – циркуляция потока вокруг профилей в области  $D_z$ ;  $\Gamma_p$  – интенсивность вихря в задней критической точке профилей в области  $D_{Bz}$ ;  $\Gamma_\gamma$  – циркуляция потока вокруг профилей в области  $D_\gamma$ ;  $q_i$  – интенсивность расхода  $i$ -го источника управления обтеканием в области  $D_{Bz}$ ;  $D_1$  – диаметр рабочего колеса на входе;  $D_2$  – диаметр рабочего колеса на выходе;  $\tau_i = \exp(i\theta_i)$ .

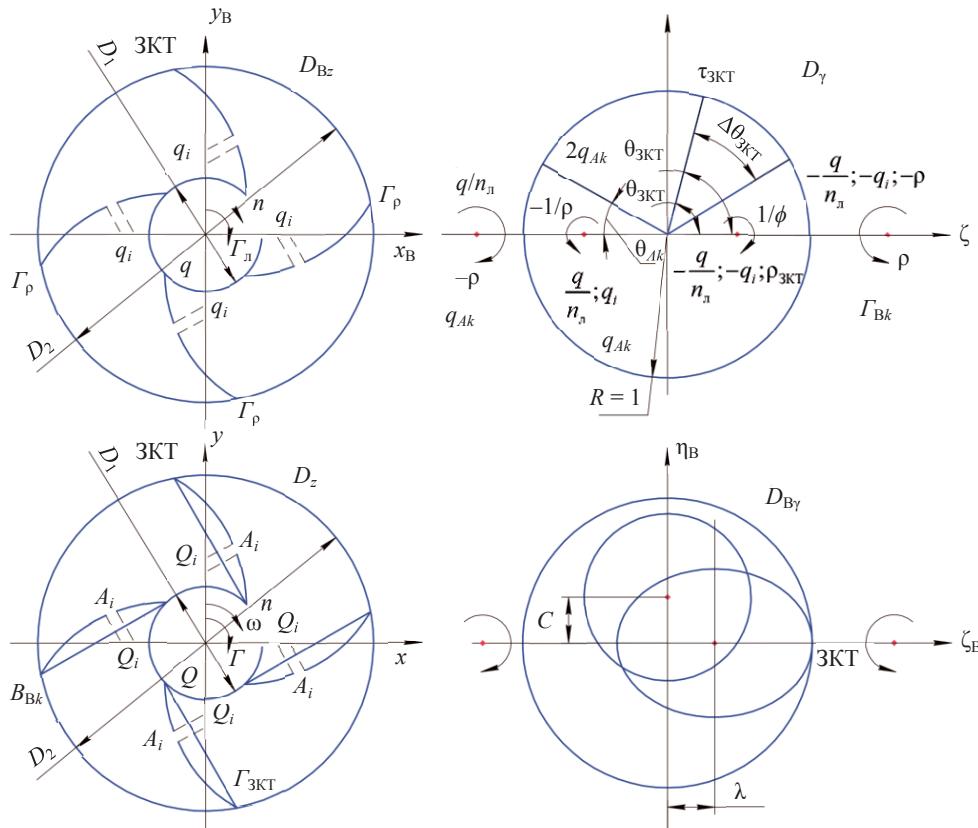


Рисунок 2. Конформные преобразования решетки профилей с отображением их критических точек  
Figure 2. Conformal transformations of profile grid with their critical points

Используя графическую модель, приведенную на рис. 2, получим потенциал течения на многолистной канонической римановой области, параметры которого являются функциями от параметров внешней сети, и построим математическую модель расчета локальной диффузорности [8, 9, 12, 13, 15].

Комплексный потенциал течения на римановой области  $D_\gamma$  с учетом [6] запишем в виде:

$$\phi(\theta) = \sum_{i=1}^n \phi_{qi}(\theta) + \phi_{pb}(\theta_{3KT}), \quad (3)$$

где  $\sum_{i=1}^n \phi_{qi}(\theta)$  – комплексный потенциал течения вокруг окружности единичного радиуса в  $n_n$ -листной римановой области  $D_\gamma$  от  $n$ -источников управления обтека-

нием в функции от полярного угла  $\theta_i$  в плоскости  $\gamma$  конформного преобразования;  $\phi_{\rho_B}(\theta_{3KT})$  – комплексный потенциал течения вокруг окружности единичного радиуса в  $n_l$ -листной римановой области  $D_\gamma$  от вихреисточника в ЗКТ.

Комплексный потенциал течения на  $n_l$ -листной римановой области  $D_\gamma$  вокруг окружности единичного радиуса от источников управления обтеканием с интенсивностью  $q_i$  с учетом [10, 12] получим в виде:

$$\phi_{q_i} = \frac{q_i(\theta_i)}{\pi} \left[ \ln(\theta - \theta_i) - \ln(\theta^2 - P) - \ln(\theta^2 - P^{-2}) \right], \quad (4)$$

где  $P$  – формпараметр эквивалентной решетки профилей в виде логарифмических спиралей;  $q_i(\theta_i)$  – интенсивность расхода  $i$ -го источника управления обтеканием, расположенного на профиле, положение которого на  $n_l$ -листной римановой области  $D_\gamma$  определяется углом  $\theta_i$  в соответствии с конформным преобразованием «аэрогазодинамических профилей» (рис. 1) на окружность единичного радиуса (рис. 2).

Комплексный потенциал течения на  $n_l$ -листной римановой области  $D_\gamma$  вокруг окружности единичного радиуса от вихря в ЗКТ с учетом [8, 10, 12] получим в виде:

$$\phi_{\rho_B} = \frac{\rho_{3KT}}{2\pi i} \ln \frac{\theta_{3KT} - P^{-1}}{\theta_{3KT} - P}, \quad (5)$$

где  $\rho_{3KT}$  – циркуляция (интенсивность вихря) в ЗКТ на многолистной римановой области, определяющей смещение ЗКТ на величину  $\Delta\theta_{3KT}$ .

Скорость течения потока вокруг окружности единичного радиуса на римановой области с учетом влияния источников управления обтеканием и вихря в ЗКТ, согласно (1)–(5), получим из формулы:

$$F_\theta(V) = \frac{d\phi}{d\theta} = \frac{q \left( \theta + P - \frac{1}{\theta - P} \right)}{\pi n_l} + \frac{\left( q - n_l \sum_{i=1}^n q_i \right)}{2\pi n_l (\theta_i + P)} + \frac{\left( q - n_l \sum_{i=1}^n q_i \right)}{2\pi n_l (\theta_i + P^{-1})} + \\ + \frac{in_l \rho + in_p \rho_{3KT} - n_l \sum_{i=1}^n q_i - q}{2\pi n_l (\theta_i + P)} - \frac{in_l \rho + in_l \rho_{3KT} + n_l \sum_{i=1}^n q_i + q}{2\pi n_l (\theta_i + P^{-1})} + \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\pi(\theta - \theta_i)}, \quad (6)$$

где  $n_l$  – количество лопаток круговой решетки профилей;  $q$  – коэффициент расхода источника, расположенного в центре круговой решетки профилей в области  $D_\gamma$ ;  $n_p$  – количество вихреисточников в ЗКТ;  $\rho$  – интенсивность вихря в центре круговой решетки профилей в области  $D_\gamma$ .

С учетом (1)–(5), [5–8] выражение для локальной диффузорности потока на «аэрогазодинамическом профиле» получим в виде:

$$F_\theta(\Delta_l^a) = 1 - \left[ \frac{d^2\phi}{d\theta^2} d\theta + \sum_{i=1}^n (q_i \theta_i) \right] \left[ \frac{d\phi}{d\theta} \right]^{-1}. \quad (7)$$

**Обсуждение результатов.** Таким образом, совместное использование конформного преобразования и метода особых точек С. А. Чаплыгина с учетом предло-

женной гипотезы о гидродинамической аналогии локальной диффузорности потока вокруг профилей и потерями энергии, обусловленными отрывным вихреобразованием потока при изменениях температурных условий окружающей среды, позволяет получить математическую модель управления энергоэффективностью адаптивных вентиляторных установок для АВО газа. Доминантой управления является интенсивность распределения по профилям источников  $q_i$ , которая определяется из условия обеспечения минимальных значений диффузорности.

Предложенная гипотеза позволяет свести задачу проектирования решетки профилей рабочего колеса вентиляторных установок для АВО газа с максимальной энергоэффективностью к классической задаче «минимакса» в условиях потенциального течения, т. е. определения оптимального значения параметра  $P(q_i\theta_i) = f(q)$  из условия минимального значения функционала (7) при фиксированном положении ЗКТ.

Для подтверждения достоверности предложенной математической модели проведены испытания решетки классических и «аэрогазодинамических профилей». В качестве доминанты управления локальной диффузорностью потока принят коэффициент профильного сопротивления решетки профилей лопаток рабочего колеса вентиляторных установок, поскольку он является ее гидродинамическим аналогом:

$$C_x = K(P)q\bar{b} \cos\beta_1 \Delta_{\text{л}}^{\text{a}}, \quad (8)$$

где  $K(P)$  – коэффициент пропорциональности, определяемый формпараметром  $P$  решетки профилей [4, 6, 7];  $\bar{b}$  – относительная ширина лопатки на входе в рабочее колесо.

Испытания решетки профилей проводились на аэrodинамическом стенде, выполненном по ГОСТ 10921-90 «Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний» в лаборатории «СМК-тест». В данной статье рассматривался вариант исполнения радиального вентилятора, конструктивно более приспособленный к формированию источников управления локальной диффузорностью внутри профилей его лопаток. Поскольку экспериментальное определение локальной диффузорности представляет большие технические трудности, в данном эксперименте с учетом формулы (8) определялось аэродинамическое сопротивление профилей в зависимости от скорости потока  $V_{\text{n}}$  при фиксированной его циркуляции. Расход источников управления локальной диффузорностью и скорость потока определялись с помощью термоанемометра РТ-8880 и измерителя расхода воздуха и температуры СЕМРТ-619. На каждом режиме скорости потока определялся минимальный расход источника  $Q_i(q_i)$ , при котором профильное сопротивление  $C_x$  имеет минимальное значение, что в соответствии с научной гипотезой равно минимальной диффузорности.

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента профильного сопротивления как аналога диффузорности потока от скорости набегающего на профиль потока  $V_{\text{n}}$ . Каждый график характеризует наличие источника конкретной точки профиля либо его отсутствие.

Из анализа приведенных на рис. 3 результатов испытаний решетки профилей видно, что наибольшая эффективность управления потерями энергии, обусловленными отрывным вихреобразованием, при минимальном усложнении конструкции рабочего колеса достигается применением источника управления обтеканием в области за максимальной толщиной профиля  $\bar{y}_{\text{max}}$  до его ЗКТ  $\bar{y}_{\text{ЗКТ}}$ . Увеличение

области экономичной работы составило не менее 43 % за счет снижения профильного сопротивления на границе области более чем в 3 раза.

При профильном сопротивлении  $C_x \leq 0,04$ , что соответствует КПД вентиляторных установок для АВО газа  $\eta \geq 0,85$ , область экономичной работы увеличивается на 43 %, а удельное энергопотребление снижается на 15 %.

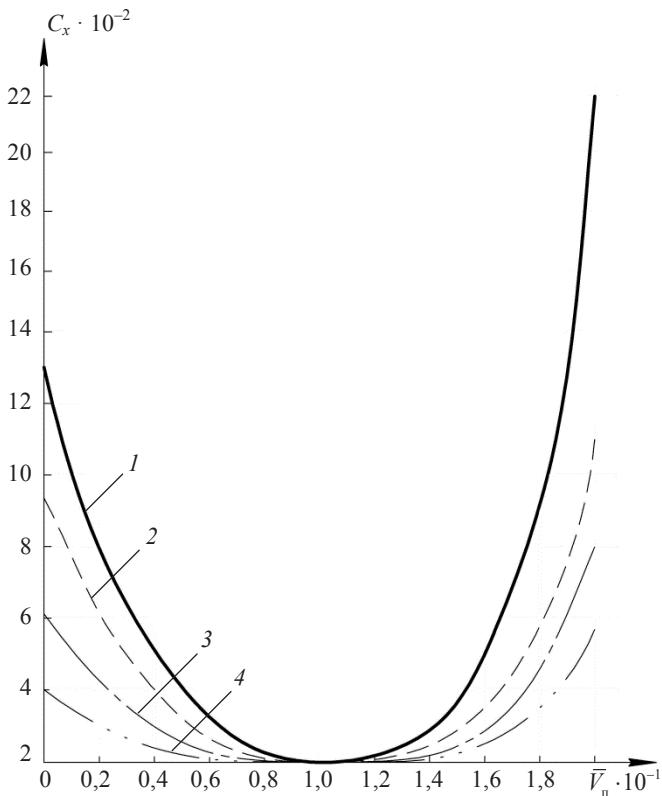


Рисунок 3. Зависимость коэффициента профильного сопротивления от скорости потока:

1 – без источников; 2 – источник в точке  $\bar{y}_{3\text{КТ}}$ ; 3 – источник в точке  $\bar{y}_{\max}$ ; 4 – источники на профиле от  $\bar{y}_{\max}$  до  $\bar{y}_{3\text{КТ}}$

Figure 3. Dependence between the profile drag coefficient and the flow velocity:

1 – without sources; 2 – source in point  $\bar{y}_{3\text{КТ}}$ ; 3 – source in point  $\bar{y}_{\max}$ ; 4 – sources on the profile anywhere from  $\bar{y}_{\max}$  to  $\bar{y}_{3\text{КТ}}$

**Выводы.** Подтверждена гипотеза о доминирующем влиянии локальной диффузорности потока, обтекающего профиль лопаток рабочего колеса, на энергоэффективность и область экономичной работы вентиляторных установок для АВО газа.

С использованием предложенной гипотезы построена математическая модель в форме функционала, минимальное значение которого определяет оптимальные параметры источников управления обтеканием, обеспечивающих наибольший прирост энергоэффективности, и области экономичной работы вентиляторных установок для АВО газа.

Распределенные источники управления обтеканием на выходном участке профиля лопаток рабочего колеса на 43 % расширяют область экономичной работы вентиляторных установок для АВО газа и снижают энергопотребление на 15 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ванчин А. Г. Методы оценки технического состояния аппаратов воздушного охлаждения газа в условиях компрессорной станции магистрального газопровода // Нефтегазовое дело. 2012. № 4. С. 466–475.
2. Калинин А. Ф., Фомин А. В. Оценка эффективности режимов работы АВО // Труды РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2011. № 4(265). С. 131–139.
3. Ванчин А. Г. Методы оценки работы аппаратов воздушного охлаждения газа при разных вариантах включения вентиляторов // Нефтегазовое дело. 2012. № 5. С. 279–286.
4. Калинин А. Ф., Меркурева Ю. С., Халлыев Н. Х. Оценка эффективности эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения газа нового поколения // Территория НЕФТЕГАЗ. 2018. № 9. С. 74–80.
5. Makarov V. N., Davydov D. Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises // Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Vol. 56. Iss. 1. P. 103–106. DOI: 10.1007/s11148-015-9791-7
6. Макаров Н. В., Макаров В. Н., Волегжанин И. А., Угольников А. В. Аддитивная математическая модель аэродинамики энергетического регулятора шахтных радиальных вентиляторов // ГИАБ. 2018. № 5. С. 171–177.
7. Иванов О. П., Манченко В. О. Аэродинамика и вентиляторы. Л.: Машиностроение, 1986. 280 с.
8. Makarov V. N., Franyuk E. E. Development of mathematical model of circular grill of piece-smooth profiles and creation on its basis of gas-sucking fans // Earth Environmental Sci. IOP Conf. Ser. 2019; 272: 032075.
9. Wang P. Mulyi-Objective desing of a transonic turbocharger compressor with reduced noise and increased efficiency. PhD thesis, UCL University, London. 2017. 213 p.
10. Макаров Н. В., Макаров В. Н., Лифанов А. В., Угольников А. В., Таугер В. М. Модификация вихревой теории круговых решеток турбомашин // ГИАБ. 2019. № 10. С. 206–214.
11. Wu D., 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.
12. Лойцинский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
13. 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.
14. Mao Y. F. Numerical study of correlation between the surge of centrifugal compressor and the piping system. PhD thesis. Xian Jiaotong University, Xian. 2016.
15. 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.
16. Николаев А. В., Максимов П. В., Лялькина Г. Б., Конотоп Д. А. Влияние процесса выделения метана на воздухораспределение в добывающих участках калийных рудников // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 6. С. 87–91. DOI:10.21440/0536-1028-2021-6-87-97

Поступила в редакцию 14 апреля 2021 года

#### Сведения об авторах:

**Макаров Николай Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: mnikolay84@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7039-6272>

**Макаров Владимир Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: uk.intelnedra@gmail.com

**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>

**Чураков Евгений Олегович** – аспирант кафедры горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.gm@m.ursmu.ru

**Арсланов Азamat Альфизович** – студент кафедры горного дела Уральского государственного горного университета. E-mail: azamat.arslanov.2000@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-72-83

#### Local diffusion airfoil control as an effective way of increasing the adaptability of gas air cooler fan unit

Nikolai V. Makarov<sup>1</sup>, Vladimir N. Makarov<sup>1</sup>, Aleksandr V. Ugolnikov<sup>1</sup>, Evgenii O. Churakov<sup>1</sup>, Azamat A. Arslanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

**Abstract**

**Problem statement.** Industrial safety and compressed gas cooling efficiency at compressor stations of the main gas pipeline is an essential task that gives urgency to the issue of mathematical modeling of energy conversion control in the impellers of gas air cooler (GAC) fan units. GAC fan units are high-speed and adaptable. So, they can make the Russian oil and gas complex highly competitive globally.

**Research objective** is to develop a method of controlling the diffusion airfoil of the impeller blade profiles, which is the main reason for GAC fan units' low adaptability.

**Methods of research.** To calculate the majorant of fan unit adaptability control, we accepted a hydrodynamic analog of local diffusion airfoil, namely, flow velocity change on the blade profile. Having applied conformal transformations, hydrodynamic analogy, and S. A. Chaplygin singular points, we have developed a method of local diffusion airfoil control which consists in changing the flow velocity using sources of influence on the blade profiles flow.

**Results.** It has been proved that the intensity of the sources distributed along the impeller blade profile is the majorant of local diffusion airfoil control. The sources determine the diffusion airfoil of the flow and, therefore, the velocity change around the profile. The experiment confirmed that the profiles constructed according to the proposed method reduce the profile drag coefficient of GAC fan unit impeller blades by more than three times, increasing the cost-effective performance by at least 43%.

**Scope of results.** The result obtained can be used at the enterprises of the Russian oil and gas complex when cooling the compressed gas with the main gas pipeline compressor station GACs.

**Keywords:** fan; circulation; source; adaptability; profile grid; conformal transformation.

**REFERENCES**

1. Vanchin A. G. Evaluation methods of the technical condition of air cooling of gas devices in the conditions of the compressor station of the main gas pipeline. *Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering*. 2012; 4: 466–475. (In Russ.)
2. Kalinin A. F., Fomin A. V. Evaluating the effectiveness of air-cooler modes. *Trudy RGU nefti i gaza imeni I. M. Gubkina = Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. 2011; 4(265): 131–139. (In Russ.)
3. Vanchin A. G. Assesment methods of air cooling of gas devices operation at different options of fans actuation. *Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering*. 2012 ; 5: 279–286. (In Russ.)
4. Kalinin A. F., Merkurieva Iu. S., Khallyev N. Kh. Operational efficiency estimate of gas air coolers of new generation. *Territoria NEfteGAZ = Oil and Gas Territory*. 2018; 9: 74–80. (In Russ.)
5. Makarov V. N., Davydov D. Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2015; 56(1): 103–106. Available from: doi: 10.1007/s11148-015-9791-7
6. Makarov N. V., Makarov V. N., Volegzhannin I. A., Ugonnikov A. V. Additive mathematical model of aerodynamics in energy adaptor of radial-flow fans in mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; 5: 171–177. (In Russ.)
7. Ivanov O. P., Manchenko V. O. *Aerodynamics and fans*. Leningrad: Mashinostroenie Publishing; 1986. (In Russ.)
8. Makarov N. V., Makarov V. N., Franyuk E. E. Development of mathematical model of circular grill of piece-smooth profiles and creation on its basis of gas-sucting fans. *Earth Environmental Sci. IOP Conf. Ser.* 2019; 272: 032075.
9. Wang P. *Multi-objective design of a transonic turbocharger compressor with reduced noise and increased efficiency*. PhD thesis, UCL University, London. 2017. 213 p.
10. Tauger V. M., Lifanov A. V., Makarov V. N., Makarov N. V. Mathematical model modification for stress state of high-speed axial fan blades in mining industry. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 10: 206–213. (In Russ.)
11. Wu D., 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.
12. Loitsianskii L. G. *Fluid mechanics*. Moscow: Drofa Publishing; 2003. (In Russ.)
13. 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.
14. Mao Y. F. *Numerical study of correlation between the surge of centrifugal compressor and the piping system*. PhD thesis. Xian Jiaotong University, Xian. 2016.
15. 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.

16. Nikolaev A. V., Maksimov P. V., Lialkina G. B., Konotop D. A. The effect of methane emission on air distribution in potash mine production units. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2022; 6: 87–91. Available from: doi:10.21440/0536-1028-2021-6-87-97

Received 14 April 2021

#### Information about authors:

**Nikolai V. Makarov** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Rock Mechanics Department, Ural State Mining University. E-mail: mnikolay84@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7039-6272>

**Vladimir N. Makarov** – DSc (Engineering), professor of Rock Mechanics Department, Ural State Mining University. E-mail: uk.intelnedra@gmail.com

**Aleksandr V. Ugolnikov** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Electrical Engineering Department, Ural State Mining University. E-mail: ugolnikov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8442-4841>

**Evgenii O. Churakov** – PhD student, Mining Mechanical Engineering Department, Ural State Mining University. E-mail: gmf.gm@m.ursmu.ru

**Azamat A. Arslanov** – student, Department of Mining Engineering, Ural State Mining University. E-mail: azamat.arslanov.2000@mail.ru

**Для цитирования:** Макаров Н. В., Макаров В. Н., Угольников А. В., Чураков Е. О., Арсланов А. А. Управление локальной диффузорностью – эффективный способ повышения адаптивности вентиляторных установок аппаратов воздушного охлаждения газа // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 1. С. 72–83. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-72-83

**For citation:** Makarov N. V., Makarov V. N., Ugolnikov A. V., Churakov E. O., Arslanov A. A. Local diffusion airfoil control as an effective way of increasing the adaptability of gas air cooler fan unit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2022; 1: 72–83 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-72-83