



DOI: 10.18721/JEST.24410
УДК 621.165-532.517

Н.Г. Иванов¹, А.И. Кириллов¹, Е.М. Смирнов¹, Н.А. Ярославцева²

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

2 – Штутгартский университет, Штутгарт, Германия

ВИХРЕВАЯ ЯЧЕЙКА КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЬЦЕВОГО ОСЕРАДИАЛЬНОГО ДИФфуЗОРА

Сформулирована мотивация к поиску новых методов снижения потерь кинетической энергии в кольцевых осерадиальных диффузорах с крутым поворотом потока, применяемым в выходных патрубках конденсационных паровых турбин. Приведены результаты численного моделирования отрывного течения в кольцевом осерадиальном диффузоре с вихревыми ячейками, предназначенными для управления отрывом потока. Численное моделирование выполнено на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса в стационарной осесимметричной постановке. Оценена эффективность вихревой ячейки в зависимости от ее размера, места расположения на поверхности диффузора вблизи зоны отрыва потока и интенсивности щелевого отсоса. Показано, что вихревую ячейку с щелевым отсосом, можно рассматривать как перспективный способ управления отрывом потока в кольцевом диффузоре с крутым поворотом потока.

Ключевые слова: осерадиальный диффузор, отрыв потока, численное моделирование, вихревая ячейка, отсос пограничного слоя.

Ссылка при цитировании:

Н.Г. Иванов, А.И. Кириллов, Е.М. Смирнов, Н.А. Ярославцева. Вихревая ячейка как средство повышения эффективности кольцевого осерадиального диффузора // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 97–105. DOI: 10.18721/JEST.24410.

N.G. Ivanov¹, A.I. Kirillov¹, E.M. Smirnov¹, N.A. Iaroslavtceva²

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany

VORTEX CELL AS A MEANS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF AN ANNULAR AXIAL-RADIAL DIFFUSER

The paper provides an explanation why new methods of reducing kinetic energy losses have to be developed for annular axial-radial diffusers with a sharp turn of the stream, used in exhaust hoods of condensing steam turbines. The results of numerical simulation of separated flow in an annular axial-radial diffuser with vortex cells intended for control of flow separation are presented. Numerical simulation is based on the solution of the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations in a steady axisymmetric formulation. The efficiency of the vortex cell is estimated depending on its size, location on the surface of the diffuser near the flow separation zone and the intensity of the slit suction. The conclusion is that the vortex cell with a slit suction can be regarded as a promising method for controlling flow separation in an axial-radial diffuser with a sharp turn of the stream.

Keywords: axial-radial diffuser, flow separation, numerical simulation, vortex cell, boundary layer suction.

Citation:

N.G. Ivanov, A.I. Kirillov, E.M. Smirnov, N.A. Iaroslavtceva, Vortex cell as a means of improving the efficiency of an annular axial-radial diffuser, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(04)(2018) 97–105, DOI: 10.18721/JEST.24410.

Введение

Кольцевой диффузор за последней ступенью — это выходной участок проточной части газовых и большинства паровых турбин, работающих в современных крупных энергосистемах.

В газовых турбинах кинетическая энергия выходной скорости потока, покидающего последнюю ступень, соответствует 7–8 % полезной мощности турбоустановки, поэтому фирмы, производящие газотурбинное оборудование, уделяют особое внимание отработке аэродинамики выходных патрубков. Максимально достигнутый уровень полезного использования выходной кинетической энергии в лучших образцах выходных патрубков мощных стационарных газовых турбин приближается к 50 %.

В мощных конденсационных паровых турбинах, работающих на крупных тепловых и атомных электростанциях, кинетическая энергия выходной скорости соответствует 2–4 % полезной мощности. Вследствие низкого давления пара в конденсаторе (3,5–6 кПа), которое необходимо поддерживать для достижения высокого термического КПД паротурбинной установки, размеры проточной части за последней ступенью турбины увеличиваются настолько, что применить эффективно работающий кольцевой осерадиальный диффузор с оптимальной формой канала нереально из-за габаритных ограничений. Поэтому выходные патрубки паровых турбин выполняют либо без диффузора (для конденсационных турбин в редких случаях), либо со встроенным в выходной патрубок осерадиальным диффузором, имеющим недостаточную протяженность в осевом направлении.

Проблеме снижения аэродинамического сопротивления осерадиальных диффузоров, встроенных в выходные патрубки паровых турбин, посвящены многочисленные экспериментальные и расчетно-аналитические исследования [1–7]. Предложен ряд мер, повышающих их эффективность. На снижение потерь, вызванных отрывом потока при его рез-

ком повороте у периферийной поверхности диффузора, положительное влияние оказывает, например, тангенциальный вдув пара в предотрывную зону. Полезной оказывается установка дефлекторов, организующих течение в диффузоре. Возможно применение отсоса пограничного слоя. Однако коэффициент полных потерь выходных патрубков современных паровых турбин находится на уровне 1,1–1,4, и задача повышения их эффективности остается весьма актуальной.

В последние два десятилетия активно развиваются исследования по применению вихревых ячеек с целью управления отрывом пограничного слоя при внешнем обтекании угловатых тел. Выполнены расчетно-аналитические работы и эксперименты [8–14], которые показали, что в случае оптимального размещения вихревых ячеек можно добиться многократного увеличения подъемной силы и снижения лобового сопротивления. Например, при обтекании полукруглого тела удалось за счет двух вихревых ячеек круглого сечения со щелевым отсосом получить шестикратное повышение подъемной силы [14]. В монографии [12] опубликованы результаты методических расчетно-экспериментальных исследований применения вихревой ячейки с отсосом с поверхности соосного цилиндрического центрального тела в плоском расширяющемся канале. Подробно обсуждается структура течения в канале и в ячейке, существенно зависящая от скорости отсоса. В [12] также представлены результаты расчетов течения в плоскопараллельном поворотном канале с круговой каверной, в том числе для условий, соответствующих эксперименту [11]. Результаты расчетов показали, что установка вихревой ячейки в области поворота может приводить к уменьшению потерь.

Таким образом, имеются достаточные предпосылки, чтобы оценить эффективность применения вихревых ячеек для снижения аэродинамического сопротивления осерадиальных диффузоров выходных патрубков паровых

турбин. С этой целью было выполнено численное исследование влияния вихревой ячейки на турбулентное течение в кольцевом осердиальном диффузоре с малым радиусом поворота потока (рис. 1), результаты которого изложены в настоящей статье.

Постановка задачи

Численное моделирование отрывного течения совершенного газа в кольцевом осердиальном диффузоре, рассмотренном ранее в [15], выполнено на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса в стационарной осесимметричной постановке. Расчетная область включала участок конфузورного течения, собственно диффузор и дополнительный участок для выравнивания радиального течения после диффузора. Течение в диффузоре обеспечивалось перепадом давления между входом, где задавалось полное давление, и выходной границей, на которой задавалось статическое давление (выход в атмосферу). Твердые стенки втулки и обечайки – адиабатические, с условием прилипания. Температура на входе в расчетную область соответствовала нормальным условиям. Интенсивность турбулентности на входе – 0,5 %, отношение турбулентной вязкости к молекулярной равно 0,5. Число Рейнольдса, вычисленное по высоте канала $h = (D_0 - d_0)/2$ и среднемассовым значениям скорости и плотности при входе в диффузор, составляло $1,8 \cdot 10^5$. Число Маха при входе потока в диффузор $M_{in} = 0,47$.

Газодинамическая эффективность диффузора оценивалась по значению коэффициента полных потерь

$$\zeta_{\text{п}} = \frac{1 - (p_2 / p_1^*)^{(k-1)/k}}{1 - (p_1 / p_1^*)^{(k-1)/k}},$$

где p_1 – статическое, а p_1^* – полное давление на входе в диффузор; p_2 – статическое давление в выходном сечении диффузора; k – показатель адиабаты.

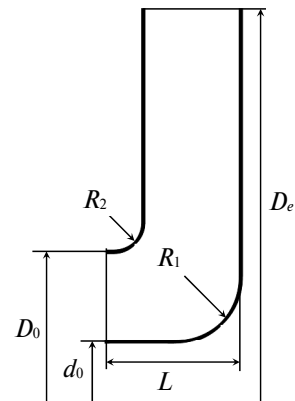


Рис. 1. Проточная часть кольцевого диффузора:

$D_0 = 186,5$ мм; $d_0 = 130,5$ мм; $L = 37,5$ мм;
 $D_e = 336$ мм; $R_1 = 20$ мм; $R_2 = 9$ мм

Fig. 1. The flow part of annular diffuser:

$D_0 = 186,5$ мм; $d_0 = 130,5$ мм; $L = 37,5$ мм;
 $D_e = 336$ мм; $R_1 = 20$ мм; $R_2 = 9$ мм

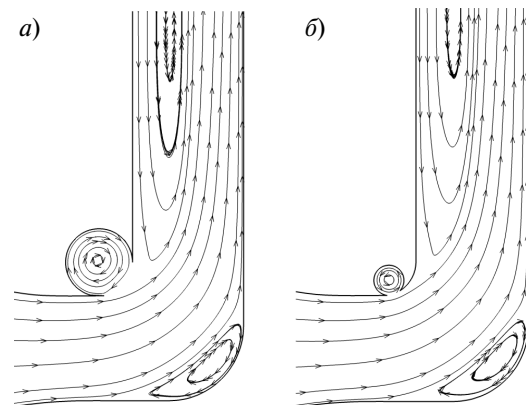


Рис. 2. Вихревые ячейки на поверхности диффузора: а) $R_c = R_2$; б) $R_c < R_2$

Fig. 2. Vortex cells on the diffuser surface:
 а) $R_c = R_2$; б) $R_c < R_2$

Рассмотрены два варианта размещения вихревой ячейки круглого сечения на периферийной поверхности диффузорного канала в зоне поворота потока (рис. 2). В первом варианте вихревая ячейка радиуса $R_c = R_2$ охватывает всю область поворота диффузора. Ячейка замещает собой или весь участок стенки на повороте потока (полностью раскрытая ячейка), или – при уменьшении угла раскрытия ячейки – лишь его начальную часть. Во втором варианте радиус ячейки R_c меньше R_2 , и степень ее влияния на основной поток зависит

от места размещения и размера ячейки. Для обоих вариантов исследовано влияние на эффективность вихревой ячейки щелевого отсоса с ее стенки. Зона отсоса размещалась на небольшом участке поверхности ячейки, противоположном входу в ячейку. Величина относительного расхода отсоса варьировалась.

Вычислительные аспекты. Для численного моделирования использован программный пакет ANSYS Fluent 17.2*, включающий следующие опции численного алгоритма:

метод Coupled с функцией Pseudo Transient, позволяющий ускорить сходимость стационарного решения;

опцию Green-Gauss-Cell-Based для вычисления градиентов по значениям в центрах ячеек;

взвешенную противопоточную схему второго порядка Standard для интерполяции давления на грань ячейки;

противопоточную схему второго порядка Second-Order-Upwind для дискретизации конвективных слагаемых при решении уравнений движения и модели турбулентности.

Предыдущие расчеты показали, что от выбора модели турбулентности зависит положение точки отрыва и уровень турбулентной вязкости за поворотом потока, что в совокупности влияет на уровень потерь [15]. В настоящей работе все расчеты выполнены с использованием SST $k-\omega$ модели турбулентности Ментера [16].

Сеточная сходимость. Для расчета проточной части диффузора была построена базовая квази-структурированная сетка размерностью 124×201 узлов, которая обеспечивала значения $y_1^+ < 1$ по всей длине диффузора. В ходе анализа сеточной сходимости решения были рассмотрены еще две сетки: огрубленная и измельченная. Качество сеток оценивалось посредством сопоставления рассчитанных полей скорости и значений коэффициента полных потерь. Для всех трех сеток результаты вычислений практически совпали.

В области вихревой ячейки была построена неструктурированная расчетная сетка со сгущениями к стенкам, а также в области взаимодействия потоков в ячейке и в диффузоре. Исследование сеточной сходимости показало, что сетка, построенная для расчета течения внутри вихревых ячеек, достаточна, чтобы решение было сеточно независимым.

Результаты расчетов

Вихревая ячейка радиуса $R_c = R_2$ (рис. 2, а). Для первого варианта размещения вихревой ячейки расчеты выполнены при двух углах раскрытия ячейки: 81° (ячейка замещает весь участок поворота потока) и $40,5^\circ$ (ячейка замещает первую половину участка поворота потока). Проанализировано также влияние щелевого отсоса воздуха из ячейки на ее эффективность.

Угол раскрытия ячейки. Независимо от величины угла раскрытия вращение воздуха в ячейке происходит в сторону, противоположную повороту основного потока. В обоих случаях входное окно ячейки оказывается в зоне возвратного течения, возникающего вследствие развитого отрыва основного потока от периферийного обвода диффузора при повороте на 90° . Вихревая ячейка не сокращает зону возвратного течения в диффузоре, а становится лишь дополнительным источником диссипативных потерь. Как показано нами несколько ранее [17], по сравнению с исходным вариантом без вихревой ячейки коэффициент полных потерь в диффузоре ζ_n возрастает на 13,7 и 17,8 % для углов раскрытия ячейки соответственно $40,5$ и 81° .

Щелевой отсос сокращает зону возвратного течения (рис. 3) и снижает потери в диффузоре. Зависимость коэффициента полных потерь от относительного расхода отсоса $G'_{suc} = G_{suc}/G_0$ (здесь G_{suc} – расход через отсос, G_0 – полный расход через диффузор) линейная. Положительный эффект от применения ячейки радиуса $R_c = R_2$ возникает лишь при больших расходах отсоса ($G'_{suc} > 4,5\%$), и ее практическое применение вряд ли целесообразно.

* ANSYS Inc. ANSYS Fluent 17.2 User's Guide, 2016.

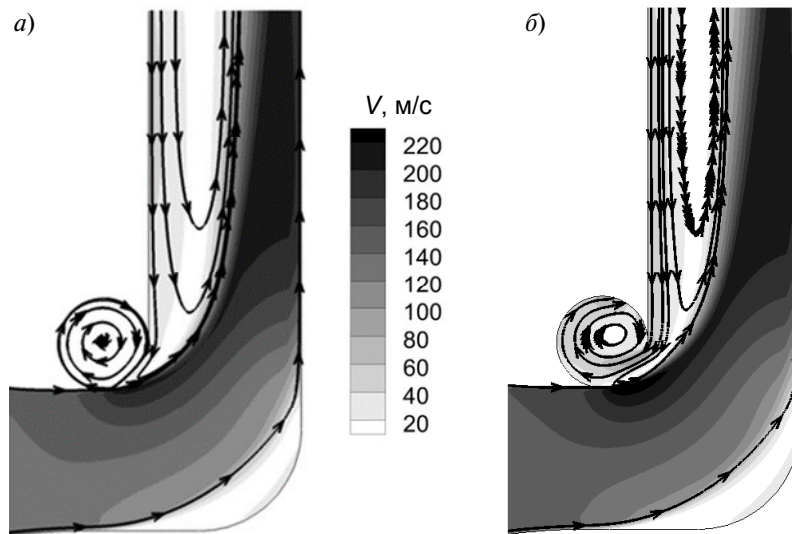


Рис. 3. Поле модуля скорости и картина линий тока в диффузоре с вихревой ячейкой $R_c = R_2$ без отсоса (а) и с отсосом $\bar{G}_{\text{сис}} = 5\%$ (б)

Fig. 3. Velocity magnitude field and streamline pattern in the diffuser with vortex cell without suction (а) and with suction $\bar{G}_{\text{сис}} = 5\%$ (б)

Вихревая ячейка радиуса $R_c < R_2$. Для круглой ячейки радиуса меньшего, чем радиус поворота периферийного обвода диффузора, выполнен расчетный анализ по поиску места ее размещения и размера, которые обеспечивают максимальную эффективность ячейки. Рассмотрено также влияние щелевого отсоса из ячейки.

Место расположения вихревой ячейки, соответствующее ее максимальной эффективности, было выбрано по результатам решения модельной задачи, в которой вихревая ячейка была заменена участком стенки с условием проскальзывания. Такое приближение позволило без перестроения геометрии расчетной области оценить, будет ли отсутствие тормозящего эффекта стенки на выбранном участке снижать потери в диффузоре. В ходе рассмотрения различных вариантов расположения ячейки было выявлено, что наибольший эффект достигается при ее размещении сразу после начала поворота. Таким образом, начало входного окна ячейки располагается в месте сопряжения прямолинейного и скругленного участков стенки.

Размер вихревой ячейки. На рис. 4 представлены результаты расчета коэффициента полных потерь в диффузоре в зависимости от радиуса вихревой ячейки R_c . В диапазоне

$3 < R_c < 5$ мм значение радиуса варьировалось с шагом 0,5 мм, а за пределами этого диапазона – с шагом 1 мм. По мере возрастания R_c в диапазоне 2,5–4 мм потери плавно снижаются. При $R_c > 4$ мм происходит резкое возрастание потерь, и эффективность вихревой ячейки становится отрицательной. Это коррелирует с предельным случаем – рассмотренной выше вихревой ячейкой, замещающей весь участок поворота потока ($R_c = 9$ мм), для которой коэффициент полных потерь в диффузоре ζ_n возрастает примерно до 1,9.

Ощутимое снижение потерь в диффузоре в некотором диапазоне радиуса вихревой ячейки ($R_c = 3$ –4 мм) связано с особенностями структуры течения в ячейке и в области взаимодействия основного потока с потоком в ячейке. По мере увеличения радиуса ячейки скорость вращающегося в ней в направлении против часовой стрелки потока возрастает. В интервале $2,5 < R_c < 4$ мм она становится достаточной для понижения давления, вызывающего смещение вниз по потоку и сокращение размера зоны отрыва основного потока у периферийного обвода диффузора. При $R_c = 4$ мм скорость у периферии ячейки достигает 75 м/с (рис. 5, а), и эффективность ячейки оказывается наибольшей.

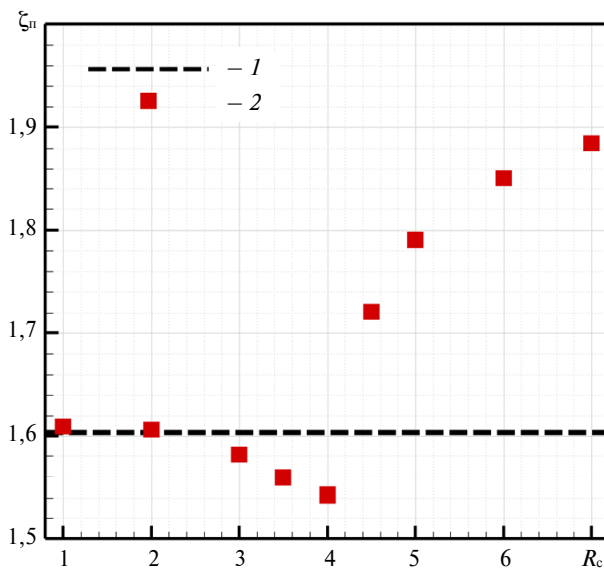


Рис. 4. Влияние радиуса вихревой ячейки R_c , мм, на потери в диффузоре

1 – значение потерь без ячейки, 2 – значения потерь с ячейкой

Fig. 4. Diffuser losses as a function of the vortex cell radius:

1 – losses without vortex cell, 2 – losses with the cell

При увеличении радиуса ячейки до 4,5 мм кинетической энергии в пристенном слое основного потока оказывается недостаточно, чтобы поддерживать в ячейке организованное вихревое течение возросшей массы воздуха с направлением вращения против часовой

стрелки. В зоне смешения зарождается второй вихрь, основной поток в ячейке меняет направление вращения, начало зоны отрыва потока от периферийного обвода диффузора смещается вверх по потоку (рис. 5, б). В результате эффективность ячейки становится отрицательной.

Щелевой отсос заметно повышает эффективность вихревой ячейки. Отсос даже небольшого количества газа резко активизирует вихревое движение в ячейке. Например, при отсосе из ячейки 0,5 % от расхода через диффузор вдвое повышается скорость у периферии ячейки и значительно увеличивается скорость основного потока у периферийного обвода диффузора. Зона отрыва основного потока при этом сдвигается вниз по течению, и коэффициент полных потерь в диффузоре снижается (рис. 6). Следует отметить, что отсос пограничного слоя непосредственно со стенки в предотрывной зоне диффузора – известное средство повышения его эффективности. Как показали расчетные оценки, применение вихревой ячейки в рассмотренном диффузоре оказывает существенный положительный эффект только в сочетании с отсосом.

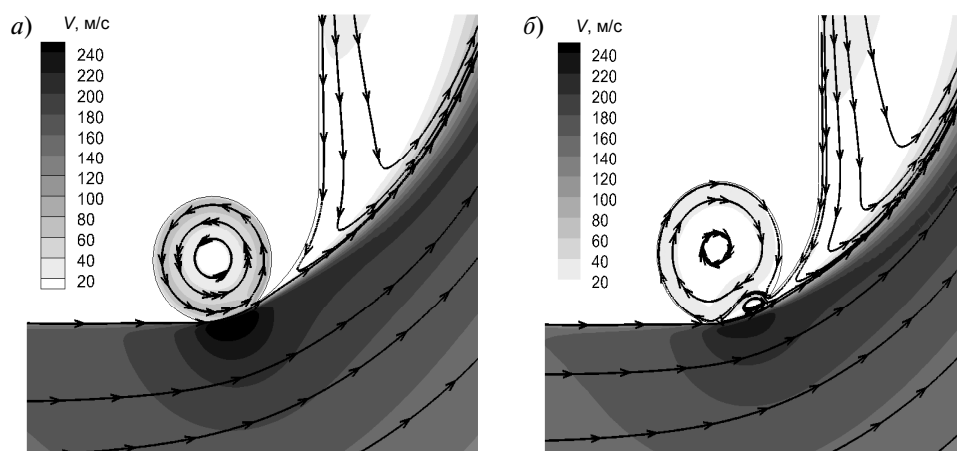


Рис. 5. Поле скорости в вихревых ячейках радиуса 4 (а) и 4,5 (б) мм

Fig. 5. Velocity field in vortex cells of 4 (a) and 4,5 (b) mm radius

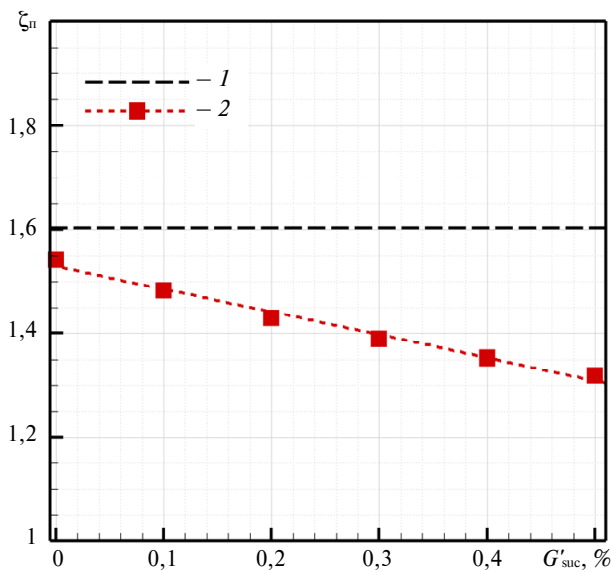


Рис. 6. Зависимость коэффициента полных потерь от расхода отсоса:

1 – значение потерь без ячейки, 2 – значения потерь с ячейкой

Fig. 6. Dependence of the total loss coefficient on the suction flow rate:

1 – losses without vortex cell, 2 – losses with the cell

Заключение

Результаты численного моделирования, выполненного с целью оценки эффективности применения вихревых ячеек для снижения потерь отрыва в осердиальном диффузоре с крутым поворотом потока, позволяют сделать следующие выводы:

применение вихревой ячейки, замещающей участок поворота периферийного обвода диффузора ($R_c = R_2$), приводит к росту потерь независимо от угла раскрытия вихревой ячейки;

положительный эффект от применения вихревой ячейки достигается в определенном диапазоне радиусов ячейки $R_c < R_2$ при рациональном ее размещении на поверхности диффузора;

отсос рабочего тела из ячейки значительно повышает ее эффективность.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-08-00854).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. М.: Энергия, 1970. 384 с.
2. Мига́й В.К., Гудков Э.И. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин. Л.: Машиностроение, 1981. 272 с.
3. Зарянкин А.Е., Симонов Б.П. Выхлопные патрубки паровых и газовых турбин. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 274 с.
4. Eriphanov V.K., Gaev V.D., Lisiansky A.S., Kirilov A.I., Nikolaev M.A., Smirnov E.M., Zaitsev D.K. Effects of deflector vane geometry on performance of large-scale turbine exhaust hood at transonic flow conditions: air-test experiments and 3D numerical simulation // Proc. of the 5th European Conference Turbomachinery. Praha, 2003. P. 803–812.
5. Ямалтдинов А.А., Сахнин Ю.А., Рябчиков А.Ю., Евдокимов С.Ю., Сергач С.В. Модернизация выхлопных патрубков ЧНД паровых турбин производства ЗАО «УТЗ» // Теплоэнергетика. 2014. № 12. С. 19–23.
6. Гудков Э.И., Тайч Л. Экспериментальное исследование совместного влияния надбандажной протечки и вдува в диффузорный канал на аэродинамические характеристики паротурбинного выхлопного тракта // Труды ЦКТИ. 2002. № 283. С. 114–122.
7. Зарянкин А.Е., Григорьев Е.Ю., Рогалев А.Н., Гарнин И.В. Исследование и аэродинамическое совершенствование выхлопного патрубка цилиндра низкого давления паровой турбины // Вестник Ивановского энергетического университета им. В.И. Ленина. 2017. Вып. 2. С. 18–26.
8. De Gregorio F., Fraioli O. Flow control on a high thickness airfoil by a trapped vortex cavity // Proc. 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. 7–10 July 2008. Lisbon. P. 1–12.
9. Donelli R.S., De Gregorio F., Iannello P. Flow Separation Control by Trapped Vortex // AIAA. 2010. Paper 2010–1409. 19 p.
10. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам

интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В. Ермишина и С.А. Исаева. М.: Изд-во МГУ, 2003. 360 с.

11. **Savelsberg R., Castro I.** Vortex flows in open cylindrical-section cavities // *Exp. Fluids*. 2009. № 46. P. 485–497.

12. Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое моделирование / Под ред. С.А. Исаева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 215 с.

13. **Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Харченко В.Б.** Моделирование эффекта увеличения подъемной силы и повышения аэродинамического качества толстого геттингеновского профиля при оптимальном расположении вихревой ячейки // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. №. 11. С. 103–110.

14. **Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г., Попов И.А., Усачов А.Е.** Управление обтеканием полукругового профиля под нулевым углом атаки при отсосе в одной и двух вихревых ячейках для дости-

жения экстремальной подъемной силы // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 24. С. 53–58.

15. **Левченя А.М., Кириллов А.И., Смирнов Е.М.** Численное моделирование отрывного течения в кольцевом осерадиальном диффузоре // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. С. 172–180. DOI: 10.18721/JEST.230417.

16. **Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.** Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4* / Ed.: K. Hanjalic, Y. Nagano and Tummers. Begell House Inc. 2003. P. 625–632.

17. **Ярославцева Н.А., Иванов Н.Г., Кириллов А.И.** Оценка эффективности применения вихревых ячеек для управления отрывом турбулентного потока в осерадиальном диффузоре // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт прикладной математики и механики. СПб.: Политех-пресс, 2018. С. 58–60.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИВАНОВ Николай Георгиевич – кандидат физико-математических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: ivanov_ng@spbstu.ru

КИРИЛЛОВ Александр Иванович – доктор технических наук ведущий инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: ai_kirillov@mail.ru

СМИРНОВ Евгений Михайлович – доктор физико-математических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: aero@phmf.spbstu.ru

ЯРОСЛАВЦЕВА Надежда Александровна – аспирант Штутгартского университета

E-mail: nadya.yaros94@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 06.11.2018

REFERENCES

[1] **Deych M.Ye., Zaryankin A.Ye.** Gazodinamika diffuzorov i vykhlopnykh trubkov turbomashin. M.: Energiya, 1970. 384 s. (rus.)

[2] **Migay V.K., Gudkov E.I.** Projektirovaniye i raschet vykhodnykh diffuzorov turbomashin. L.: Mashinostroyeniye, 1981. 272 s. (rus.)

[3] **Zaryankin A.Ye., Simonov B.P.** Vykhlopnyye trubki parovykh i gazovykh turbin. M.: Izdatelstvo MEI, 2002. 274 s. (rus.)

[4] **Epiphanov V.K., Gaev V.D., Lisiansky A.S., Kirillov A.I., Nikolaev M.A., Smirnov E.M., Zaitsev D.K.** Effects of def-

lector vane geometry on performance of large-scale turbine exhaust hood at transonic flow conditions: air-test experiments and 3D numerical simulation. *Proc. of the 5th European Conference Turbomachinery*. Praha, 2003. P. 803–812.

[5] **Yamaltidinov A.A., Sakhnin Yu.A., Ryabchikov A.Yu., Evdokimov S.Yu., Sergach S.V.** Modernization of exhaust hoods of low-pressure sections of steam turbines manufactured by the Ural Turbine Works. *Thermal Engineering*. 2014. Vol. 61. Is. 12. P. 864–867.

[6] **Gudkov E.I., Taych L.** Eksperimentalnoye issledovaniye sovmestnogo vliyaniya nadbandazhnoy pro-



techki i vduva v diffuzornyy kanal na aerodinamicheskiye kharakteristiki paroturbinogo vykhlopного тракта. *Trudy TsKTI*. 2002. № 283. S. 114–122. (rus.)

[7] **Zaryankin A.Ye., Grigoryev Ye.Yu., Rogalev A.N., Garnin I.V.** Issledovaniye i aerodinamicheskoye sovershenstvovaniye vykhlopного patrubka tsilindra nizkogo davleniya parovoy turbiny. *Vestnik Ivanovskogo energeticheskogo universiteta im. V.I. Lenina*. 2017. Vyp. 2. S. 18–26. (rus.)

[8] **De Gregorio F., Fraioli O.** Flow control on a high thickness airfoil by a trapped vortex cavity. *Proc. 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. 7–10 July 2008. Lisbon. P. 1–12.

[9] **Donelli R.S., De Gregorio F., Iannelly P.** Flow Separation Control by Trapped Vortex. *AIAA*. 2010. Paper 2010–1409. 19 p.

[10] Upravleniye obtekaniyem tel s vikhrevymi yacheykami v prilozhenii k letatelnym apparatam integralnoy komponovki (chislennoye i fizicheskoye modelirovaniye) / Pod red. A.V. Yermishina i S.A. Isayeva. M.: Izd-vo MGU, 2003. 360 s. (rus.)

[11] **Savelsberg R., Castro I.** Vortex flows in open cylindrical-section cavities. *Exp. Fluids*. 2009. № 46. P. 485–497.

[12] Aerodinamika utolshchennykh tel s vikhrevymi yacheykami. Chislennoye i fizicheskoye i modelirovaniye / Pod red. S.A. Isayeva. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2016. 215 s. (rus.)

[13] **Isaev S.A., Sudakov A.G., Usachov A.E., Kharchenko V.B.** Modeling an increase in the lift and aerodynamic efficiency of a thick Göttingen airfoil with optimum arrangement. *Technical Physics Letters*. 2015. Vol. 41. Is. 6. P. 561–564.

[14] **Isaev S.A., Baranov P.A., Sudakov A.G., Popov I.A., Usachov A.E.** Controlling the flow past a semicircular airfoil at zero angle of attack using slot suction in one or two vortex cells for attaining extremal lift. *Technical Physics Letters*. 2017. Vol. 43. Is. 12. P. 1115–1117.

[15] **Levchenya A.M., Kirillov A.I., Smirnov E.M.** Numerical simulation of separated flow in an annular axial-radial diffuser. *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*. 23(04)(2017) 172–180. DOI: 10.18721/JEST.230417. (rus.)

[16] **Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.** Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4* / Ed.: K. Hanjalic, Y. Nagano and Tummers. Begell House Inc., 2003. P. 625–632.

[17] **Iaroslavtceva N.A., Ivanov N.G., Kirillov A.I.** Evaluation of the efficiency of the vortex cell application to control the separation in the axial-radial diffuser / In: *Proc. of XLVII International Young Researchers Conference «SPbPU Week of Science», Institute of Applied Mathematics and Mechanics*. St.-Petersburg, Russia. November 19–24, 2018. S. 58–60. (rus.)

THE AUTHORS

IVANOV Nikolai G. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: ivanov_ng@spbstu.ru

KIRILLOV Aleksandr I. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: ai_kirillov@mail.ru

SMIRNOV Evgenii M. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: aero@phmf.spbstu.ru

IAROSLAVTCEVA Nadezhda A. – *Universität Stuttgart*

E-mail: nadya.yaros94@gmail.com

Received: 06.11.2018