

УДК 621.165

doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.03

В. П. СУББОТОВИЧ, Ю. А. ЮДИН, А. В. ЛАПУЗИН, А. Ю. ЮДИН, В. Л. ШВЕЦОВ**ВЛИЯНИЕ НЕОСЕСИМЕТРИЧНОГО ВДУВА ПОТОКА В ДИФфуЗОРЕ НА РАБОТУ ВЫХЛОПНОГО ПАТРУБКА ЦНД ТУРБИНЫ**

АННОТАЦИЯ Приведены результаты расчетных аэродинамических исследований диффузора, характерного для выходных патрубков современных паровых турбин. Расчеты выполнены с учетом специального вдува потока на внешнем обводе диффузора и надбандажной протечки. Показано, что на течение в диффузоре и неосесимметричной сборной камере выхлопного патрубка существенно влияют параметры вдува потока. Определены оптимальные параметры струи вдува с учетом выхода потока из выхлопного патрубка в конденсатор подвального типа. Даны рекомендации по улучшению аэродинамических характеристик диффузора за счет изменения конструкции, в области специального вдува потока.

Ключевые слова: выходной патрубок турбомашин, вдув потока, коэффициенты потерь, осесимметричный диффузор, коэффициент импульса струи, циркуляционная зона.

V. P. SUBOTOVICH, Yu. A. YUDIN, A. V. LAPUZIN, A. Yu. YUDIN, V. L. SHVETSOV**INFLUENCE OF NONAXISYMMETRIC FLOW INJECTION INTO THE DIFFUSER ON THE TURBINE LPC EXHAUST NOZZLE**

ABSTRACT The data of computational aerodynamic investigations carried out for the diffuser used by the discharge nozzles of modern steam turbines have been given. The calculations were done using the axisymmetric statement for the three options of flow turn to the collection chamber of exhaust nozzles. During the computation, we varied the parameters of special flow injection at the external diffuser by-pass and took into account the above-shroud leakage. The following characteristics were analyzed, in particular the flow injection jet pulse coefficient and the coefficients of net, internal and outlet velocity losses of the diffuser. It was shown that the outlet velocity loss produced the basic influence on the level of net losses of the diffuser due to the flow pattern and the availability of separated circulation zones, and the diffuser flow and the flow of nonaxisymmetric collection chamber of the exhaust nozzle are subjected to the substantial influence of flow injection parameters. Optimal parameters of the injection jet were determined taking into consideration the flow discharge from the exhaust nozzle into the capacitor of a cellar type. The recommendations were given on how to improve the aerodynamic characteristics of the diffuser due to a change in the structure in the region of special injection of the flow. A circumferential change in the size of the output slit of circular channel at the invariable total area of steam output allows for a decrease of mixing losses in the collection chamber and circular nonuniformity of the pressure behind the last cascade for the diffuser cowling flow without separation that results in a decrease of the net losses of exhaust nozzle. Proposed recommendations can be used to provide special injection of the flow of wet steam mixture removed from the circumferential zone of the last stage, increasing thus the efficiency of the exhaust zone of steam turbine with the cellar arrangement of the capacitor and retaining the erosion reliability of the last stage of low pressure cylinder.

Key words: turbine machine discharge nozzle, flow injection, loss coefficients, axisymmetric diffuser, injection jet pulse coefficient, and the circulation zone.

Введение

В настоящее время достигнута высокая степень совершенства лопаточных аппаратов. В тоже время в выхлопных патрубках имеются значительные резервы повышения экономичности. В диффузорных выхлопных патрубках одним из эффективных способов управления течением и снижения полных потерь является вдув потока в пограничный слой на внешнем обводе диффузора [1–3]. В современных паровых турбинах используют специальный вдув потока, источником которого является влажнопаровой поток, удаляемый в выхлопной патрубков для снижения влажности в периферийной зоне последней ступени [2, 3]. Однако при выборе размеров выходной щели кольцевого канала на наружном обводе диффузора в окружном направлении не учтен пространственный характер течения рабочего тела в диффузоре и корпусе выхлопного патрубка с односторонним выходом пара

в конденсатор [2, 3]. В таких конструкциях с постоянным размером щели [4] не могут быть обеспечены оптимальные параметры струи вдуваемого пара в окружном направлении, что увеличивает потери на смешение пара, выходящего из щели, с основным потоком в корпусе выхлопного патрубка. При этом также увеличивается окружная неравномерность давления за последней ступенью, что снижает экономичность и надежность турбины.

Цель работы

Улучшить аэродинамические характеристики выхлопных патрубков с односторонним выходом потока на основе обобщения расчетных аэродинамических исследований диффузоров в широком диапазоне изменения импульса струи вдува.

Исследованные модели диффузоров и параметры рабочего тела

Односторонний выход рабочего тела из сборной камеры обуславливает различный характер течения в каждом из участков осередиального диффузора выхлопного патрубка в окружном направлении. Если со стороны конденсатора потока в диффузоре и сборной камере достаточно повернуться на 90° , то с противоположной стороны поворот потока увеличивается до 270° .

Выполнены [2, 3] расчетные исследования с помощью *CFD* трех осесимметричных моделей осередиальных диффузоров *D90*, *D180*, *D270*, которые имитируют течение в характерных зонах выхлопного патрубка. На наружном обводе имеется щель для вдува рабочего тела, что характерно для выхлопных патрубков современных паровых турбин. Компьютерные модели диффузоров ($y^+ \approx 1$, $k-\epsilon$) отличались местом расположения выходного сечения 2. Диффузор *D90* имитирует течение в зоне конденсатора (рис. 1), диффузор *D180* – в зоне горизонтального разъема (рис. 2), диффузор *D270* – в зоне крышки выхлопного патрубка (рис. 3).

Определялись и анализировались следующие аэродинамические характеристики осередиальных диффузоров:

- 1) Коэффициент полных потерь

$$\zeta_n = \frac{1 - (P_2/P_1^*)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - (P_1/P_1^*)^{\frac{k-1}{k}}},$$

где P_1 и P_1^* – давление и давление торможения во входном сечении 1; P_2 – давление в выходном сечении 2 диффузоров *D90*, *D180*, *D270* (рис. 1–3); k – показатель адиабаты рабочего тела.

- 2) Коэффициент потерь с выходной скоростью

$$\zeta_{\text{вых}} = \frac{1 - (P_2/P_2^*)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - (P_1/P_1^*)^{\frac{k-1}{k}}},$$

где P_2^* – давление торможения в выходном сечении 2.

- 3) Коэффициент внутренних потерь

$$\zeta = \zeta_n - \zeta_{\text{вых}}.$$

- 4) Коэффициент импульса струи вдува

$$C_\mu = \frac{2G_{\text{вд}} C_{\text{вд}}}{G_{\text{ос}} C_{\text{ос}}},$$

где $G_{\text{ос}}$ и $C_{\text{ос}}$ – расход и осредненная скорость основного потока в сечении 1; $G_{\text{вд}}$ и $C_{\text{вд}}$ – расход и осредненная скорость потока вдува в сечении 3.

- 5) Относительный коэффициент полных потерь

$$\bar{\zeta}_n = \zeta_n^i / \zeta_n^{\text{min}},$$

где ζ_n^i – значения коэффициента полных потерь диффузора, соответствующие текущим значениям коэффициента импульса струи вдува C_μ ; ζ_n^{min} – минимальное значение коэффициента полных потерь в исследованном диапазоне коэффициента C_μ .

Течение в вариантах *D90*, *D180*, *D270* представлено линиями равных расходов (рис. 1–3) при оптимальных значениях коэффициента импульса струи вдува C_μ , которые отличаются друг от друга и зависят от течения за пределами диффузора – в сборной камере (рис. 4).

В варианте диффузора *D90* при отсутствии вдува ($C_\mu = 0$) поток отрывается от наружного обвода вблизи входного сечения, образуется большая циркуляционная зона. Относительный коэффициент полных потерь имеет наибольшее значение 2,1. Увеличение импульса струи вдува сопровождается отклонением основного потока в сторону наружного обвода и уменьшением области отрывного течения. При коэффициенте импульса $C_\mu = 0,18$ течение в диффузоре становится безотрывным и коэффициент потерь диффузора имеет минимальное значение (рис. 1). Снижение коэффициента полных потерь, которое имеет место при увеличении C_μ , происходит в основном за счет коэффициента потерь с выходной скоростью $\zeta_{\text{вых}}$. Увеличение коэффициента C_μ более 0,18 практически не влияет на течение в диффузоре *D90* и коэффициент полных потерь (рис. 4).

Для вариантов диффузоров *D180* и *D270* зависимости $\zeta_n = f(C_\mu)$ имеют явно выраженный оптимум.

В варианте *D180* минимальное значение коэффициента полных потерь получено при значении коэффициента импульса струи вдува $C_\mu \approx 0,13$ (рис. 4). В диапазоне коэффициента $C_\mu = 0-0,13$ рост C_μ происходит переход от отрывного к безотрывному течению в диффузоре (рис. 2). Дальнейшее увеличение давления в камере вдува и, соответственно, коэффициента C_μ больше чем $\sim 0,13$ сопровождается ростом коэффициента $\bar{\zeta}_n$. При таких значениях C_μ , несмотря на безотрывное течение в диффузоре, рост коэффициента $\bar{\zeta}_n$ связан с изменением течения в сборной камере, где на основной поток действует высокоскоростная струя вдува, оттесняя его к цилиндрической стенке, и увеличивая размеры циркуляционной зоны в сборной камере.

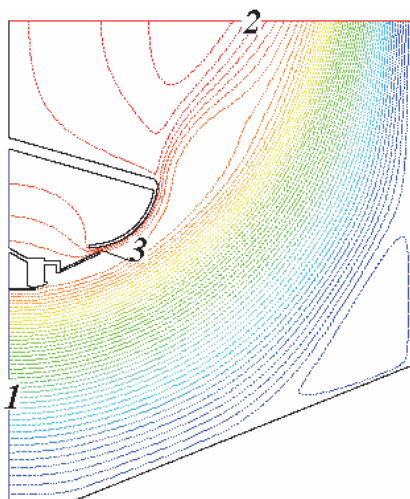


Рис. 1 – Линии равных расходов диффузора D90 при $C_\mu = 0,18$: 1, 2, 3 – сечения

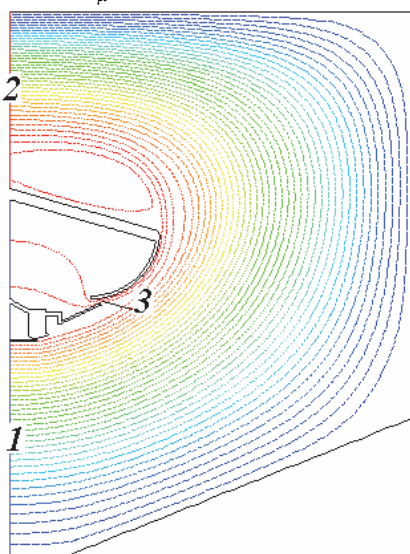


Рис. 2 – Линии равных расходов диффузора D180 при $C_\mu = 0,13$: 1, 2, 3 – сечения

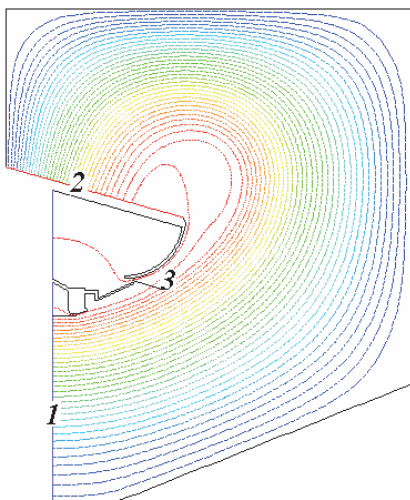


Рис. 3 – Линии равных расходов диффузора D270 при $C_\mu = 0,07$: 1, 2, 3 – сечения

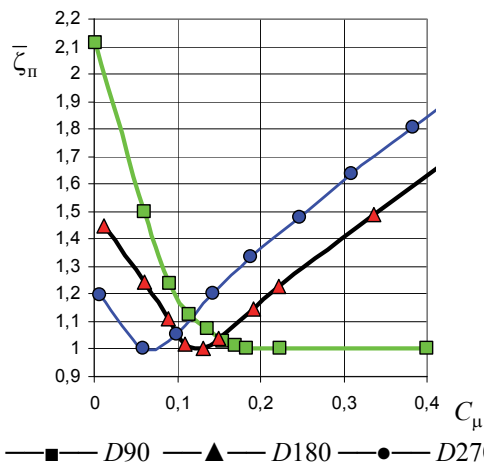


Рис. 4 – Зависимость коэффициента $\bar{\zeta}_\pi$ от C_μ

В варианте D270 значение оптимального коэффициента импульса C_μ уменьшается до значения 0,07. В этом варианте диффузора на коэффициент полных потерь оказывают влияние обе его составляющие $\zeta_{\text{вых}}$ и ζ . При минимальном давлении в камере вдува, когда специальный вдув практически отсутствует, поток отрывается от наружного обвода диффузора вблизи входного сечения 1. Коэффициент полных потерь $\zeta_\pi = \zeta + \zeta_{\text{вых}} = 0,22 + 0,63 = 0,85$ ($\bar{\zeta}_\pi = 1,2$) имеет относительно большое значение, как за счет внутренних потерь, так и потерь с выходной скоростью. При увеличении импульса струи вдува до оптимального ($C_\mu = 0,07$) течение в диффузоре становится безотрывным (рис. 3) и коэффициенты потерь ζ , $\zeta_{\text{вых}}$ снижаются до минимальных значений $\zeta_\pi = \zeta + \zeta_{\text{вых}} = 0,14 + 0,56 = 0,7$. Как и в варианте D180, коэффициенты C_μ больше оптимального, несмотря на безотрывное течение в диффузоре, являются избыточными при взаимодействии струи вдува с основным потоком в сборной камере, где поток разворачивается на угол $\sim 270^\circ$.

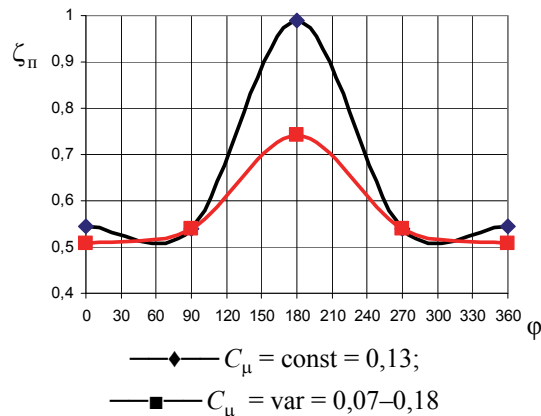


Рис. 5 – Изменение локальных коэффициентов ζ_π в окружном направлении

Проведенные исследования показали, что величина оптимального импульса струи пара из выходной щели, взаимодействующего с основным потоком, зависит от угла поворота потока в диффузоре. При увеличении угла поворота потока в сборной камере уменьшаются оптимальные значения импульса струи специального вдува. Если обеспечить плавное распределение локальных коэффициентов C_{μ} в окружном направлении таким образом, что максимальное $C_{\mu} = 0,18$ будет в зоне выхода потока, а минимальное значение – 0,07 в зоне крышки выхлопного патрубка при сохранении в зоне горизонтального разъема значения $C_{\mu} = 0,13$, то окружная неравномерность коэффициентов полных потерь и соответственно давлений снизится в два раза, а коэффициент полных потерь на 12 % (рис. 5). На рис. 5 углы $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 360^\circ$ соответствуют зоне нижней части корпуса выхлопного патрубка там, где поток поворачивается на 90° (вариант D90). Углы $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$ соответствуют области горизонтального разъема патрубка (вариант D180). Угол $\varphi = 180^\circ$ соответствует зоне верхней части корпуса, где поток поворачивается на 270° (вариант D270).

Из анализа работы выходной части ЦНД следует, что давление во влагуолавливающей камере не изменяется в окружном направлении и определяется необходимым количеством влажно-паровой смеси, удаляемой из последней ступени, что обеспечивает ее эрозионную стойкость.

Чтобы обеспечить переменный в окружном направлении импульс струи вдува достаточно изменять на наружном обводе диффузора размер выходной щели кольцевого канала вдува.

Расчеты с различными размерами выходной щели на наружном обводе диффузора показали, что средний вдоль окружности размер щели l_{cp} является оптимальным для зоны горизонтального разъема корпуса, где поток поворачивается на угол, близкий к 180° .

Размер выходной щели $(1,4-1,6)l_{cp}$ является оптимальным для нижней части корпуса в зоне, ближайшей к выходному сечению, через которое пар направляется в конденсатор. Размер выходной щели $(0,4-0,6)l_{cp}$ является оптимальным для верхней части корпуса (крышка выхлопного патрубка). Для других зон корпуса выхлопного патрубка размеры щели кольцевого канала в окружном направлении равномерно изменяются при условии сохранения общей площади выхода пара из щели.

Выводы

Проведенные исследования показали, что величина оптимального импульса струи пара из выходной щели, взаимодействующего с основным потоком, зависит от угла поворота потока в диффузоре и может быть реализована с помощью пе-

ременного размера щели вдува.

Предлагается выполнить переменным в окружном направлении размер выходной щели, которая сужается в верхней и расширяется в нижней частях корпуса выхлопного патрубка, сохраняя неизменной площадь щели. Это сохраняет уровень эрозионной надежности последней ступени, а также снижает окружную неравномерность давления за последней ступенью в два раза и уменьшает коэффициент полных потерь выхлопного патрубка на 12 %.

Полученные результаты могут быть использованы как при проектировании новых, так и при модернизации существующих конструкций.

Список литературы

- 1 **Мигай, В. К.** Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин / **В. К. Мигай, Э. И. Гудков** – Ленинград : Машиностроение, 1981. – 272 с.
- 2 **Юдин, А. Ю.** Исследование осесимметричных диффузоров выходных патрубков турбомашин со специальным вдувом потока // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 3(80). – С. 80–84. – ISSN 1727-7337.
- 3 **Юдин, Ю. А.** Аэродинамические исследования участка выходного диффузора турбины со специальным вдувом потока / **Ю. А. Юдин, В. П. Субботович, А. В. Лапузин, А. Ю. Юдин** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 12(986). – С. 30–35. – Бібліогр. : 5 назв. – ISSN 2078-774X.
- 4 Пат. 2053373 Российская Федерация, МПК F01D 25/30 Выхлопная часть турбомашин / **Косяк Ю. Ф., Вирченко М. А., Галацан В. Н. и др.**, Заявитель и патентообладатель ОАО «Турбоатом». – №4649389 ; заявл. 13.02.89 ; опубл. 27.01.96, Бюл. № 3. – 3 с. : ил.
- 5 Пат. 110332 Україна, МПК F01D 25/30 (2006.01). Вихлопна частина парової турбіни / **Юдин Ю. А., Швецов В. Л., Субботович В. П., Лапузин А. В., Юдин А. Ю.** ; власник Національний технічний університет «ХПІ». – у 2016 02201 ; заявл. 09.03.2016 ; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Migay, V. K. and Gudkov, E. I.** (1981), *Proektirovanie i raschet vyihodnyih diffuzorov turbomashin [Design and calculation of output diffusers of turbomachines]*, Mashinostroenie, Leningrad, Russia
- 2 **Yudin, A. Yu.** (2011), "Issledovanie osesimmetrichnyih diffuzorov vyihodnyih patrubkov turbomashin so spetsialnyim vduvom potoka [Investigation of turbomachines exhaust chamber axisymmetric diffusers with special injection flow]", *Aviacionnokosmicheskaja tehnika i tehnologija*, No. 3, pp. 80–84, ISSN 1727-7337/
- 3 **Yudin, Yu. A., Subbotovich, V. P., Lapuzin, A. V. and Yudin, A. Yu.** (2013), "Aerodinamicheskie issledovaniya uchastka vyihodnogo diffuzora turbinyi so spetsialnyim vduvom potoka [Aerodynamical investigations of turbine exhaust diffuser part with a special flow injection]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and*

- heat engineering processes and quipment, no. 12(986), pp. 30–35.
- 4 **Kosyak, Yu. F., Virchenko, M. A., Galatsan, V. N. and Garkusha, A. V.** et al., NPO «Turboatom» (1996), *Vykhlopna chast turbomashiny*, Russian, IPC. F01D25/30, Pat. 2053373.
- 5 **Yudin, Yu. A., Shvetsov, V.L., Subotovich, V. P., Lapuzin, A. V. and Yudin, A. Yu.**, NTU "KhPI" (2016), *Vykhlopna chastyna parovoi turbiny*, Kharkov, Ukraine, IPC. F01D25/30, Pat. 110332

Сведения об авторах (About authors)

Субботович Валерий Петрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: alex78ua@yahoo.com, ORCID 0000-0002-7051-4758.

Subotovich Valery – Doctor of Technical Sciences, Senior research fellow, Professor of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Юдин Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: yury55yudin@ukr.net, ORCID 0000-0002-9770-2273.

Yudin Yuriy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, Professor of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Лапузин Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры турбиностроения; г. Харьков, Украина; ORCID – 0000-0002-6445-3979.

Lapuzin Alexander – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate professor, Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Юдин Александр Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: alex78ua@yahoo.com, ORCID 0000-0001-5098-7796.

Yudin Alexander – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior research fellow, Senior researcher of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Швецов Виктор Леонидович – кандидат технических наук, главный конструктор паровых турбин, Публичное акционерное общество «Турбоатом», г. Харьков, Украина; e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua.

Shvetsov Victor – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), chief-designer of steam turbines, Private Joint Stock Company "Turboatom", Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Субботович, В. П. Влияние неосесимметричного вдува потока в диффузоре на работу выхлопного патрубка ЦНД турбины / **В. П. Субботович, Ю. А. Юдин, А. В. Лапузин, А. Ю. Юдин, В. Л. Швецов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 24–28. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.03.

Please cite this article as:

Subotovich, V., Yudin, Yu., Lapuzin, A., Yudin, A. and Shvetsov, V. (2017), "Influence of Nonaxisymmetric Flow Injection into the Diffuser on the Turbine LPC Exhaust Nozzle", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 24–28, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.03.

Будь ласка посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Субботович, В. П. Вплив невісесиметричного вдуву потоку в дифузори на роботу вихлопного патрубка ЦНД турбіни / **В. П. Субботович, Ю. О. Юдін, О. В. Лапузін, О. Ю. Юдін, С. О. Темченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 24–28. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.03.

АНОТАЦІЯ Наведено результати розрахункових аеродинамічних досліджень дифузора, характерного для вихідних патрубків сучасних парових турбін. Розрахунки виконані з урахуванням спеціального вдуву потоку на зовнішньому обводі дифузора і надбандажної витокі. Показано, що на течію у дифузори і невісесиметричній збірній камері вихлопного патрубка істотно впливають параметри вдуву потоку. Визначено оптимальні параметри струменя вдуву з урахуванням виходу потоку з вихлопного патрубка в конденсатор підвального типу. Надано рекомендації щодо покращення аеродинамічних характеристик дифузора за рахунок зміни конструкції, в області спеціального вдуву потоку.

Ключові слова: вихідний патрубок турбомашини, вдув потоку, коефіцієнти втрат, вісесесиметричний дифузор, коефіцієнт імпульсу струменя, циркуляційна зона.

Поступила (received) 08.02.2017