

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.165

Анастасия Дмитриевна Брекоткина

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), магистр высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: brekotkina.ad@gmail.com

Елена Юрьевна Семакина

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), кандидат технических наук, доцент высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: g.semakinalena@gmail.com

Павел Николаевич Броднев

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), кандидат технических наук, доцент высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: pbrodnev@mail.ru

Виктор Александрович Черников

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), доктор технических наук, профессор высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: viktor.chernikov@gmail.com

Обоснование нестандартной геометрии выходного тракта ЦНД паровой турбины на примере К-300-240-2 ЛМЗ

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время потери кинетической энергии в выходных трактах ЦНД значительны, так как внутри них расположены многочисленные распорные стержни и направляющие пластины. Необходим принципиально новый подход к проектированию конструкции выходных трактов ЦНД, исключающий внутренние элементы в проточной части и обеспечивающий снижение потерь за счет улучшения формы диффузора и сборной камеры.

Материалы и методы. Моделирование течения в рассматриваемых вариантах конструкции выходного тракта проведено численным методом RANS с моделью турбулентности SST. Для валидации CFD-модели использованы результаты предыдущих экспериментальных исследований модели базового варианта конструкции. Сравнение проведено по интегральным аэродинамическим характеристикам выходного тракта.

Результаты. Для базового варианта конструкции выходного тракта, варианта без внутренних элементов, а также для варианта без внутренних элементов и с новой геометрией сборной камеры по результатам численного эксперимента получены распределения давлений и векторные поля скоростей в выходном сечении патрубка, по которым определены интегральные характеристики выходного тракта. Доказано преимущество выхлопного тракта без внутренних элементов и с новой формой сборной камеры по интегральным характеристикам: коэффициенту внутренних потерь выходного

тракта; коэффициенту кинематической неравномерности потока; коэффициенту восстановления давления в осерадиальном диффузоре.

Выводы. Предложенный новый подход к формированию геометрии выходных трактов ЦНД обеспечивает повышение их аэродинамических качеств при проектировании новых паровых турбин большой мощности для работы в составе ТЭС и АЭС. Выигрыш от снижения потерь энергии в одном тракте многократно увеличивается, так как в современных паровых турбинах количество потоков ЦНД может достигать восьми.

Ключевые слова: паровая турбина, выхлопной патрубков, диффузор, аэродинамика, энергетические потери

Anastasiia Dmitrievna Brekotkina

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Master degree student of Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: brekotkina.ad@gmail.com

Elena Yur'evna Semakina

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: g.semakinalena@gmail.com

Pavel Nikolaevich Brodnev

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: pbrodnev@mail.ru

Viktor Aleksandrovich Chernikov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: viktor.chernikov@gmail.com

Justification of nonstandard geometry of exhaust duct of steam turbine low pressure cylinder: case study of K-300-240-2 LMZ

Abstract

Background. Presently the losses of kinetic energy in the exhaust duct of low-pressure cylinder are considerable, since numerous spacer bars and directing plates are located inside. A fundamentally new approach is required to design the exhaust duct of LPC without internal elements in water passage and providing the decline of losses due to improvement of the diffuser form and collapsible chamber.

Materials and methods. The flow modeling in the considered exhaust duct design was carried out by the numerical RANS method with the SST turbulence model. To validate the CFD model, the results of the previous experimental studies of the basic design model were used. The comparison of the integral aerodynamic characteristics of the exhaust duct was carried out.

Results. For the basic variant of the exhaust duct, the variant without internal elements, and also for the variant without internal elements and with new geometry of the collapsible chamber, according to the results of the numeral experiment, distribution of pressure and vector fields of speeds in the exhaust nozzle are received and the integral parameters of the exhaust duct are defined. Advantage of the integral descriptions of the exhaust duct without internal elements and with a new form of collapsible chamber is proven. They are the coefficient of internal losses of the exhaust duct, the coefficient of kinematics unevenness of the stream, and the coefficient of repressuring in an axial-radial diffuser.

Conclusions. It has been established that a new approach of geometry of the exhaust duct of LPC provides the improvement of their aerodynamic qualities when designing new high-powered steam-turbines to operate in TPP and NPP. The advantage of losses decline of energy in the exhaust duct is multiple, because the number of LPC streams in modern seam-turbines can amount up to eight.

Key words: steam turbine, exhaust nozzle, diffuser, aerodynamics, power losses

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.005-013

Введение. Проектирование выходных трактов (ВТ) мощных паровых турбин ведется в настоящее время с ориентацией в основном на экспериментальные данные, полученные на модельных стендах

при постоянных параметрах потока во входном сечении тракта [1–4]. Однако, согласно опыту эксплуатации и данным натурных испытаний ВТ мощных паровых турбин, коэффициенты потерь ВТ дей-

ствующих турбоустановок оказываются заметно большими, чем по результатам экспериментов на модельных стендах. Одна из главных причин указанного различия в коэффициентах потерь – радиальная и окружная неравномерности параметров на входе в реальный патрубок, существенно влияющие на трехмерный характер течения в ВТ [5–7].

По результатам экспериментальных исследований выходных трактов «диффузор–патрубок» [8–10], основным источником потерь являются многочисленные внутренние элементы (пластины и стержни), расположенные в проточной части выходного тракта. Пластины призваны перераспределять поток в патрубке. Стержни – обеспечивать его прочность. В [9] и [10] представлены результаты испытаний выходного тракта «диффузор–патрубок» для двухвальной ГТУ. Ее выходной тракт отличается от выходного тракта ЦНД более развитым диффузором. Но и в такой конструкции также происходит интенсивное окружное перераспределение потока, но наблюдается оно в диффузоре, где располагаются силовые стойки, что тоже ведет к дополнительным потерям.

Поиск новых геометрических форм проточных частей входных трактов с односторонним отводом рабочего тела ведется как на самих предприятиях, так и научно-исследовательскими организациями по заказу промышленности [2, 11, 12]. Значительные результаты в оптимизации проточных частей выходных трактов достигнуты в последние годы с помощью численного моделирования [13–18].

Необходимость уменьшения коэффициента потерь и организации более равномерного в окружном направлении отвода пара из тракта обуславливает актуальность выбранной темы.

Целью данной работы является обоснование использования геометрии выходного тракта, отличной от стандартной конструкции выходных трактов «диффузор–патрубок» с односторонним отводом, в целях снижения коэффициента внутренних потерь выходного тракта (коэффициента потерь полного давления). Для достижения этой цели необходимо определить пути выравнивания потока в окружном направлении в патрубке, не прибегая к многочисленным направляющим и перераспределяющим элементам в проточной части вы-

ходного тракта. Для этого проводится численное моделирование выходных трактов «диффузор–патрубок» с односторонним выхлопом и осесимметричным восьмисторонним выхлопом.

Постановка задачи. Выполняется исследование геометрии и внутренних элементов выходного тракта на возникающие потери в блоке «диффузор–патрубок». Моделирование нескольких вариантов геометрических моделей с односторонним и неодносторонним отводом рабочего тела в конденсатор и их последующий расчет проводится в программном пакете Ansys CFX. Для оценки полученных результатов в качестве основных критериев используются интегральные характеристики, такие как коэффициент внутренних потерь выходного тракта, коэффициент восстановления давления осерадиальным диффузором и коэффициент кинематической неравномерности потока.

Методы исследования. Результаты численного моделирования течения представлены для трех вариантов конструкции выходного тракта «диффузор–патрубок». В качестве базового варианта используется выходной тракт турбины ЛМЗ К-300-240-2. Расчеты выполнены в программном пакете ANSYS CFX v19.3. Моделирование проведено методом RANS. Для замыкания системы уравнений Навье-Стокса использована модель турбулентности SST.

Построение расчетной модели выполнено при предположении о равномерности полей полного давления и температуры во входном сечении. В базовом варианте выходного тракта «А», а также в варианте «Б», который отличается от «А» отсутствием внутренних загромождений, входным сечением было сечение 0-0 – вход подводящего канала (рис. 1).

Аэродинамические качества выходного тракта оценивались по интегральным характеристикам, рассчитываемым по трем контрольным сечениям: 1 – входное сечение осерадиального диффузора (INLET); 2 – сечение на выходе потока из осерадиального диффузора; 3 – выходное (OUTLET) сечение патрубка. В качестве основных (интегральных) аэродинамических характеристик тракта использованы следующие величины:

- коэффициент внутренних потерь выходного тракта (коэффициент потерь полного давления)

$$\zeta = \frac{p_{1cp}^* - p_{3cp}^*}{\rho_{1cp} \frac{c_{1cp}^2}{2}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где p_{1cp}^* и p_{3cp}^* – полное избыточное давление на входе и выходе из тракта, осредненное по всей поверхности; ρ_{1cp} – плотность потока на входе, осредненная по всей поверхности; c_{1cp} – скорость потока на входе, осредненная по всей поверхности;

- коэффициент кинематической неравномерности потока в выходном сечении патрубка

$$\chi_3 = \frac{c_{3max} - c_{3min}}{c_{3cp}}, \quad (2)$$

где c_{3max} , c_{3min} , c_{3cp} – величина скорости потока в исследуемом сечении, принимающая максимальное, минимальное и среднее значения;

- коэффициент восстановления давления осерадиальным диффузором

$$C_p = \frac{p_{2cp} - p_{1cp}}{\rho_{1cp} \frac{c_{1cp}^2}{2}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где p_{1cp} , p_{2cp} – статические давления во входном сечении и в сечении выхода потока из осерадиального диффузора при входе и выходе потока из осерадиального диффузора, осредненные по площади контрольного сечения.

Схемы расположения сечений 0-0, 1-1, 2-2 и 3-3 представлены на рис. 1–3.

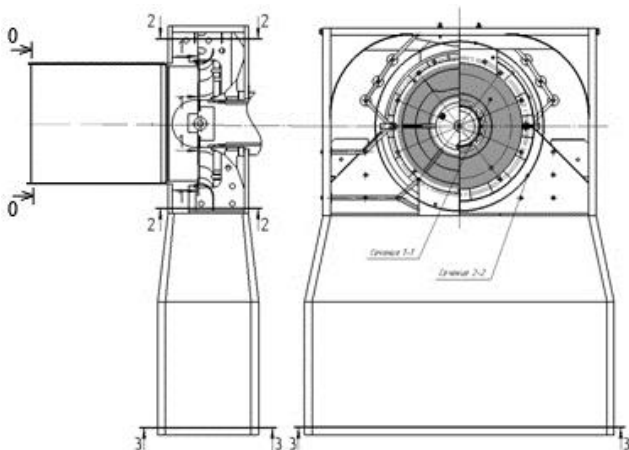


Рис. 1. Схема расположения основных сечений модели ВТ А

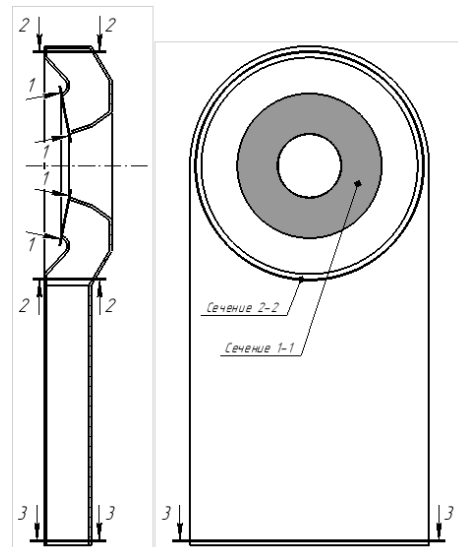


Рис. 2. Схема расположения основных сечений модели ВТ Б

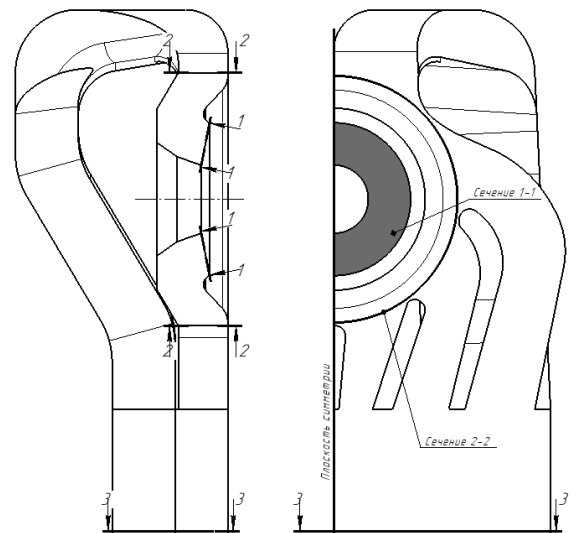


Рис. 3. Схема расположения основных сечений модели ВТ В

В ходе работы произведены расчеты трех вариантов геометрии выходного тракта. На рис. 4 представлена твердотельная модель выходного тракта А с односторонним отводом рабочего тела в конденсатор, проточная часть которого содержит распорные стержни и пластины для организации течения рабочего тела. Данная модель построена в соответствии с прототипом. Жесткость корпуса обеспечивается системой внутренних распорных стержней круглого сечения. Также в тракте после осерадиального диффузора находятся ребра, организующие поток и обеспечивающие жесткость конструкции.

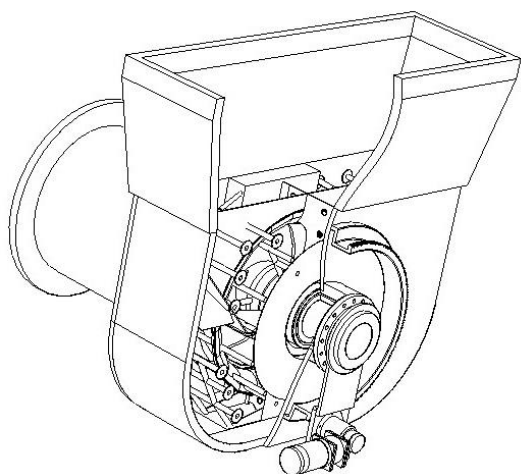


Рис. 4. Твёрдотельная модель выходного тракта А (модель конструкции лаборатории турбиностроения СПбПУ)

Вариант расчетной модели *Б* представляет собой упрощенную модель с односторонним отводом рабочего тела в конденсатор, созданную на основе продольного разреза паровой турбины К-300-240-2 ЛМЗ без учета внутренних элементов. Расчетная модель *В* представляет собой такой же единственный выходной патрубок, отводящий поток пара от последней ступени турбины в подвальный конденсатор. Коренное отличие модели *В* от классического выходного патрубка (модель *А*) состоит в том, что она сконструирована из восьми отдельных отводов (по четыре симметричных отвода с каждой стороны ЦНД). В случае моделей *Б* и *В* предполагается внешнее оребрение тракта для придания жесткости конструкции. Основные геометрические параметры диффузора расчетных моделей *Б* и *В* представлены на рис. 5.

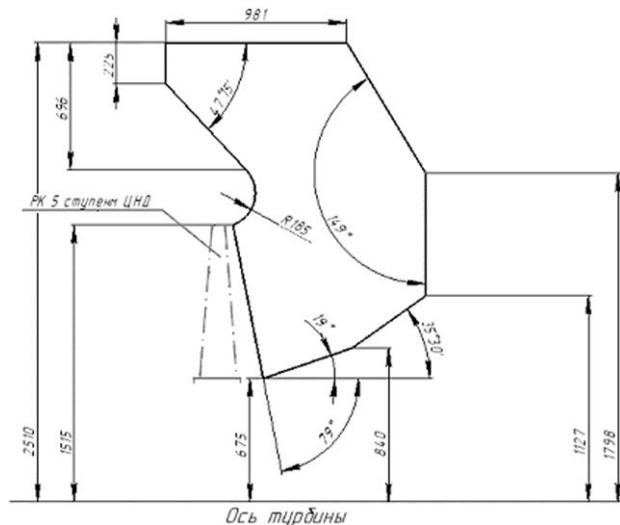


Рис. 5. Основные геометрические параметры диффузора

Для всех расчетов построена неструктурированная тетраэдральная сетка с пристеночными призматическими элементами. На входе в осерадиальный диффузор в качестве граничных условий задавались полная температура и полное давление пара (параметры на выходе из пятой ступени ЦНД), а на выходе из тракта – статическое давление в конденсаторе. Полное давление и температура получены в результате расчета по среднему сечению и оптимизации проточной части ЦНД. Начальные условия для трех моделей одинаковы и сведены в табл. 1.

Таблица 1. Граничные условия для расчета

№	Сечение	Граничные условия
1	Входное сечение в осерадиальный диффузор	$p_{in}^* = 7996 \text{ Па};$ $T_{in}^* = 314,5 \text{ К}$
2	Выходное сечение из выходного патрубка	$p_{out} = 5000 \text{ Па}$
3	Поверхности, ограничивающие расчетную область (стенки)	Mass and momentum – no slip wall; Wall roughness – smooth wall; Heat transfer – adiabatic.

Валидация расчетной модели течения проведена по результатам испытаний крупномасштабной (1:12) воздушной модели изолированного выходного тракта на стенде ЭС-ОВ-ЦНД.1 Лаборатории турбиностроения СПбПУ. Для числа Маха $M = 0,6$ результаты сравнения расчета и эксперимента по величине коэффициента потерь ζ представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение результатов расчета и эксперимента для варианта А

$\zeta_{\text{эксп}}$	$\zeta_{\text{расч}}$ по модели		Относительное отклонение $\frac{\zeta_{\text{эксп}} - \zeta_{\text{расч}}}{\zeta_{\text{эксп}}}, \%$	
	$k-\epsilon$	$k-\omega$ SST	$k-\epsilon$	$k-\omega$ SST
1,51	1,415	1,4241	8,26 %	7,47 %

Исходя из результатов валидации, в дальнейших расчетах использована модель турбулентности $k-\omega$ SST.

Результаты исследования. Анализ результатов численного моделирования. Наглядными результатами численного

моделирования трех разных численных моделей выходного тракта паровой турбины являются линии тока, векторные поля скоростей в характерных плоскостях и сечениях модели.

На рис. 6–8 представлены поля скоростей в выходном сечении трактов с различной геометрией. В выходном сечении тракта *A* наблюдается центральный парный вихрь, расположенный симметрично относительно оси турбины. В выходном сечении тракта *B* существуют два парных вихря, смещенные относительно оси. Разница обуславливается отсутствием направляющих пластин в проточной части тракта, позволяющих перенаправить поток рабочего тела. В выходном сечении тракта *B* количество вихрей увеличивается до четырех, расположенных во всей выходной плоскости тракта.

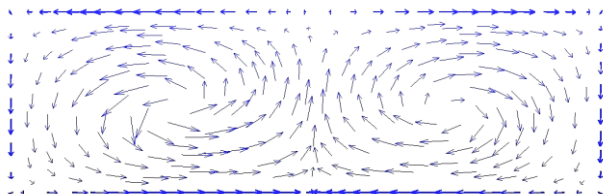


Рис. 6. Поле скоростей в выходном сечении тракта *A*

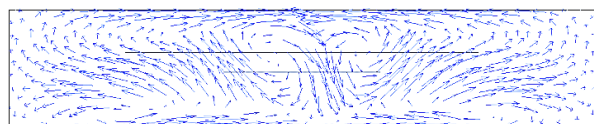


Рис. 7. Поле скоростей в выходном сечении тракта *B*

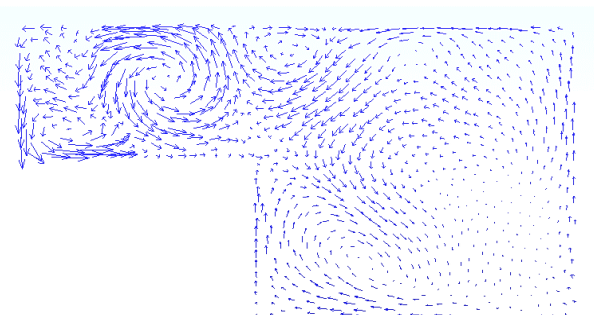


Рис. 8. Поле скоростей в выходном сечении тракта *B*

Распределения давлений в выходном сечении тракта представлены на рис. 9–11. Для моделей *A* и *B* характерны участки разряжения, находящиеся в центральной части выходного сечения. На рис. 9 данные участки занимают до 25 % площади всей плоскости. В случае восьмистороннего отвода рабочего тела в конденсатор имеется

один очаг разряжения, находящийся между двумя нижними патрубками. В остальной части выходного сечения тракта *B* наблюдается более равномерное распределение давлений, чем в конструкции одностороннего отвода рабочего тела в конденсатор.

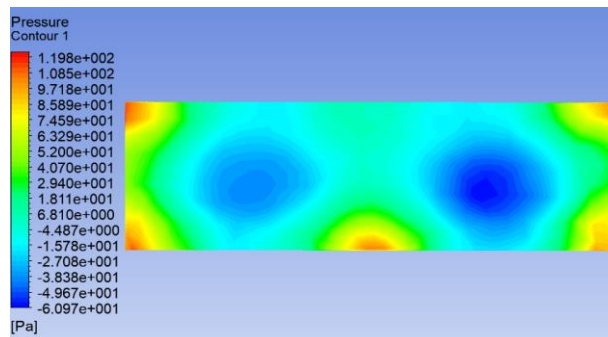


Рис. 9. Поле статического давления в выходном сечении тракта *A*

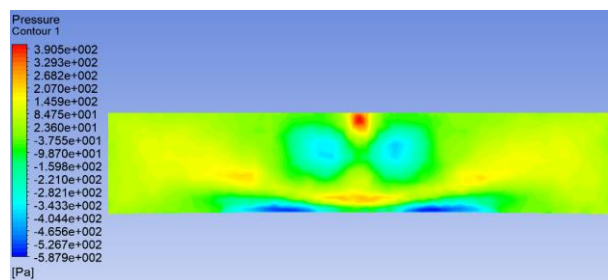


Рис. 10. Поле статического давления в выходном сечении тракта *B*

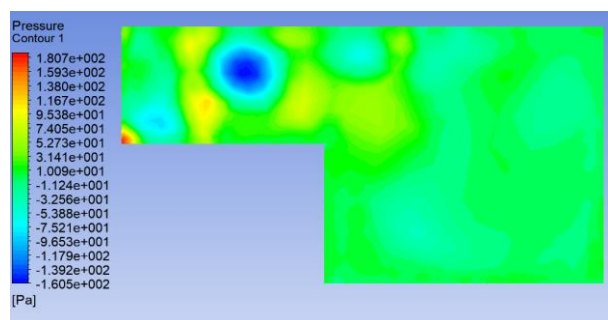


Рис. 11. Поле статического давления в выходном сечении тракта *B*

Результатами численного моделирования вариантов выходного тракта паровой турбины являются следующие интегральные характеристики:

- коэффициент внутренних потерь выходного тракта;
- коэффициент кинематической неравномерности потока;
- коэффициент восстановления давления осерадиальным диффузором.

Расчет вышеперечисленных характеристик приведен в табл. 3.

Таблица 3. Интегральные характеристики выходного тракта

Параметр	Ед. изм.	Формула	Модель выходного тракта		
			А	Б	В
ρ_{1cp}^*	Па	–	2992	3557	2972
ρ_{3cp}^*	Па	–	447	2619	457
ρ_{1cp}	Па	–	714	1765	767
ρ_{2cp}	Па	–	858	2073	1756
ρ_{1cp}	кг/м ³	–	0,079	0,052	0,043
C_{1cp}	м/с	–	163	178	292
C_{3cp}	м/с	–	98,1	288,8	185,5
C_{3max}	м/с	–	170,6	383,7	321,4
C_{3min}	м/с	–	10,06	0,69	8,64
ζ	–	$\frac{\rho_{1cp}^* - \rho_{3cp}^*}{\rho_{1cp} \frac{C_{1cp}^2}{2}}$	1,524	1,234	1,209
χ_3	–	$\frac{C_{3max} - C_{3min}}{C_{3cp}}$	1,637	1,326	1,686
C_p	–	$\frac{\rho_{2cp} - \rho_{1cp}}{\rho_{1cp} \frac{C_{1cp}^2}{2}}$	0,137	0,372	0,541

Таким образом, более равномерный по окружности отвод пара из осерадиального диффузора (вариант В) обладает более высокими аэродинамическими характеристиками, чем модели традиционной геометрии (варианты А и Б). С учетом того, что в настоящее время развитие паровых турбин идет по пути увеличения мощности единичных агрегатов, эффект от снижения потерь в выхлопном тракте каждой турбины возрастает в несколько раз, так как увеличение мощности единичного агрегата достигается, в частности, за счет увеличения числа выхлопов, количество которых может достигать восьми.

Выводы. На основе выполненного численного моделирования предложен новый путь развития аэродинамического совершенствования выходных трактов паровых турбин большой единичной мощности.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в многостороннем отводе пара из выходного сечения осерадиального диффузора, который является неотъемле-

мой составляющей выхлопных трактов ЦНД паровых турбин. Это обеспечивает существенное снижение потерь кинетической энергии и заметное улучшение эффективности восстановительного процесса в диффузоре за счет более рациональной организации течения в нем.

Достоверность численного моделирования подтверждается удовлетворительным сопоставлением результатов расчета базового варианта конструкции с экспериментальными данными. Наименьшим внутренним сопротивлением (коэффициентом внутренних потерь) обладает вариант выходного тракта с неодносторонним отводом рабочего тела в конденсатор (в данном случае с четырьмя выходными патрубками). Коэффициент потерь выходного тракта модели В ниже базового варианта, построенного на основе прототипа, на 22,5 %.

Минимальный коэффициент неравномерности в выходном сечении тракта по результатам расчета получен в варианте выходного тракта без внутренних элементов и составляет 1,33. В случае вариантов модели А и В присутствует разброс, составляющий 3 % от величины коэффициента χ_{3A} , равной 1,637.

Наибольшей эффективностью отличается диффузор модели выходного тракта В, коэффициент восстановления давления которого C_{pB} равен 0,54. В случае с численной моделью прототипа данный параметр равен 0,14.

Изменение проточной части выходного тракта в сторону увеличения количества отводов в конденсатор влечет за собой более равномерное распределение потока в выходном сечении без использования направляющих пластин и прочих внутренних элементов. Уменьшение коэффициента внутренних потерь выходного тракта и увеличение значения коэффициента восстановления давления в случае модели с восьмью отводами в конденсатор превалирует над незначительным увеличением коэффициента кинематической неравномерности потока в варианте геометрии с внутренними элементами (стержнями и пластинами), который является численной моделью выходного тракта прототипа.

Список литературы

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выходных трактов турбомашин. – М.: Энергия, 1970. – 384 с.

2. **Жирицкий О.Г., Федан В.Т.** Особенности конструкции, характеристики и доводка выхлопных патрубков газотурбинных двигателей НПП «Машпроект» // Известия акад. инж. наук Украины. – Николаев, 1999. – Вып. 1. – С. 189–194.

3. **Мигай В.К., Гудков Э.И.** Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин. – Л.: Машиностроение. ЛО, 1981. – 222 с.

4. **Гоголев И.Г., Дроконов А.М.** Аэродинамические характеристики ступеней и патрубков тепловых турбин. – Брянск: Брянское областное издательство «Грани», 1995. – 258 с.

5. **Hoffman J.A., Ganzalez G.** Effects of Small-Scale, High Intensity Turbulence of Flow in a Two-Dimensional Diffuser // ASME Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. – 1984. – Vol. 106, Jun. – P. 121–124.

6. **Черников В.А., Семакина Е.Ю.** Выходные тракты турбин [Электронный ресурс]: Методика экспериментального исследования и численного моделирования: учеб. пособие / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт энергетики и транспортных систем, кафедра «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели». – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 5,49 Мб). – СПб., 2015.

7. **Модернизация** выхлопных трактов ЧНД паровых турбин производства ЗАО «УТЗ» / А.А. Ямалтдинов, Ю.А. Сахнин, А.Ю. Рябчиков и др. // Теплоэнергетика. – 2014. – № 12. – С. 19–23.

8. **Оптимизация** выходного тракта ЦНД мощной паровой турбины на базе экспериментальных исследований / А.С. Лисянский, В.А. Рассохин, Е.Ю. Семакина, В.А. Черников // Научно-технические ведомости СПбПУ. – 2012. – № 2–1(147). – С. 48–56.

9. **Семакина Е.Ю., Хоанг В.Ч., Черников В.А.** Аэродинамические процессы в выходном тракте стационарной газовой турбины // Научно-технические ведомости СПбПУ. Сер.: Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 49–60.

10. **Семакина Е.Ю., Черников В.А., Хоанг В.Ч.** Экспериментальные аэродинамические исследования выходного тракта двухвальной ГТУ мощностью 100 МВт // Теплоэнергетика. – 2019. – № 6. – С. 1–11.

11. **Выхлопные** патрубки газотурбинных двигателей. Опыт создания и новые разработки / Ю.В. Бешинский, С.Н. Вершковский, О.Г. Жирицкий и др. // Судовое и энергетическое газотурбостроение: науч.-техн. сб. в 2 т. – Николаев, 2004. – С. 81–84.

12. **Особенности** проектирования выхлопного патрубка паровой турбины К-175/180-12,8 ТЭС / Н.Н. Гудков, В.И. Кириллов, С.А. Кошелев и др. // Российская энергетика – 2009: совершенствование теплотехнического оборудования, реконструкция ТЭС, вне-

дение систем сервиса: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Урал. техн. ун-т – Урал. политех. ин-т, 2009. – С. 46–55.

13. **Адамсон Д.А., Галаев С.А., Кириллов А.И.** Проектирование выходных патрубков мощных паровых турбин на основе вариантных расчетов трехмерного течения // Проблемы машиностроения. – 2012. – Т. 15, № 3–4. – С. 37–43.

14. **Трухний А.Д., Ломакин Б.В.** Паровые и газовые турбины для электростанций: учеб. для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 560 с.

15. **Modernization** of exhaust hoods of low-pressure sections of steam turbines manufactured by the Ural Turbine Works / A.A. Yamaltdinov, Y.A. Sakhnin, A.Y. Ryabchikov, et al. // Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 61, No. 12. – P. 864–867.

16. **Wang H., Zhu X., Du Z.** Aerodynamic optimization for low pressure turbine exhaust hood using Kriging surrogate model // International communications in heat and mass transfer. – 2010. – Vol. 37, No. 8. – P. 998–1003.

17. **St'astny M., Kolar P., Tucek A.** 3D flow in the axialradial exhaust hood of a steam turbine // Journal of Thermal Science. – 1997. – Vol. 6, No. 4. – P. 237–240.

18. **Ris V.V., Smirnov E.M., Kirillov A.I.** Numerical simulation of flow in a steam-turbine exhaust hood: Comparison results of calculations and data from a full-scale experiment // Thermal Engineering. – 2009. – No. 56. – P. 277–283.

References

1. Deych, M.E., Zaryankin, A.E. *Gazodinamika diffuzorov i vykhodnykh traktov turbomashin* [Gas dynamics of diffusers and exhaust ducts of turbo machine]. Moscow: Energiya, 1970. 384 p.

2. Zhiritskiy, O.G., Fedan, V.T. *Osobnosti konstruktсии, kharakteristiki i dovodka vykhlopnnykh patrubkov gazoturbinnnykh dvigateley NPP «Mashproekt»* [Structural features, parameters and debugging of exhaust ducts of gas turbine combustion engine of NPP «Mashproekt»]. *Izvestiya akademii inzhenernykh nauk Ukrainy*. Nikolaev, 1999, issue 1, pp. 189–194.

3. Migay, V.K., Gudkov, E.I. *Proektirovanie i raschet vykhodnykh diffuzorov turbomashin* [Design and calculation of exhaust diffusers of turbo machine]. Leningrad: Mashinostroenie. LO, 1981. 222 p.

4. Gogolev, I.G., Drononov, A.M. *Aerodinamicheskie kharakteristiki stupeney i patrubkov teplovykh turbin* [Aerodynamic stage and nozzle characteristics of steam turbine]. Bryansk: Bryanskoe oblastnoe izdatel'stvo «Grani», 1995. 258 p.

5. Hoffman, J.A., Ganzalez, G. Effects of Small-Scale, High Intensity Turbulence of Flow in a Two-Dimensional Diffuser. *ASME Journal of*

Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 1984, vol. 106, Jun, pp. 121–124.

6. Chernikov, V.A., Semakina, E.Yu. *Vykhodnye trakty turbin: Metodika eksperimental'nogo issledovaniya i chislennogo modelirovaniya* [Experiment technique and numerical modeling: educational aid]. Saint-Petersburg, 2015.

7. Yamaltdinov, A.A., Sakhnin, Yu.A., Ryabchikov, A.Yu., Evdokimov, S.Yu., Sergach, S.V. Modernizatsiya vykhlopnykh traktov ChND parovykh turbin proizvodstva ZAO «UTZ» [Modernization of exhaust ducts of low pressure steam turbine of ZAO «UTZ»]. *Teploenergetika*, 2014, no. 12, pp. 19–23.

8. Lisyanskiy, A.S., Rassokhin, V.A., Semakina, E.Yu., Chernikov, V.A. Optimizatsiya vykhodnogo trakta TsND moshchnoy parovoy turbiny na baze eksperimental'nykh issledovaniy [Optimization of exhaust ducts of low-pressure cylinder of powerful steam turbine in the framework of experimental research]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU*, 2012, no. 2–1(147), pp. 48–56.

9. Semakina, E.Yu., Khoang, V.Ch., Chernikov, V.A. Aerodinamicheskie protsessy v vykhodnom trakte statsionarnoy gazovoy turbiny [Aerodynamic processes in exhaust duct of stationary gas turbine]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 49–60.

10. Semakina, E.Yu., Chernikov, V.A., Khoang, V.Ch. Eksperimental'nye aerodinamicheskie issledovaniya vykhodnogo trakta dvukhval'noy GTU moshchnost'yu 100 MVt [Experimental aerodynamic research of exhaust duct of cross-compound gas turbine generator]. *Teploenergetika*, 2019, no. 6, pp. 1–11.

11. Beshinskiy, Yu.V., Vershkovskiy, S.N., Zhiritskiy, O.G., Isakov, B.V., Starodubets, V.A., Fedan, V.T. Vykhlopnye patrubki gazoturbinykh dvigateley. Opyt sozdaniya i novye razrabotki [Exhaust nozzles of gas turbine generators. Experience and innovations]. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik «Sudovoe i energeticheskoe gazoturbostroenie» v 2 t. Nikolaev*, 2004, pp. 81–84.

12. Gudkov, N.N., Kirillov, V.I., Koshelev, S.A. Osobennosti proektirovaniya vykhlopnoy patrubki parovoy turbiny K-175/180-12,8 TES [Peculiarities of design of exhaust nozzles of gas turbine K-175/180-12,8 TTP]. *Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Rossiyskaya energetika – 2009: sovershenstvovanie teplo-tekhnicheskogo oborudovaniya, rekonstruktsiya TES, vnedrenie sistem servisa»* [Russian power industry – 2009: perfection of thermal power equipment, TTP reconstruction/ service system introduction]. Ekaterinburg: Ural'skiy tekhnicheskiy universitet-Ural'skiy politekhnicheskiy institut, 2009, pp. 46–55.

13. Adamson, D.A., Galaev, S.A., Kirillov, A.I. Proektirovanie vykhodnykh patrubkov moshchnykh parovykh turbin na osnove variantnykh raschetov trekhmernogo techeniya [Design of exhaust nozzles of powerful steam turbine based on variants calculation of three-dimensional flow]. *Problemy mashinostroeniya*, 2012, vol. 15, no. 3–4, pp. 37–43.

14. Trukhniy, A.D., Lomakin, B.V. *Parovye i gazovye turbiny dlya elektrostantsiy* [Steam and gas turbine for PP]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2008. 560 p.

15. Yamaltdinov, A.A., Sakhnin, Y.A., Ryabchikov, A.Y., Evdokimov, S.Y., 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, no. 12, pp. 864–867.

16. Wang, H., Zhu, X., Du, Z. Aerodynamic optimization for low pressure turbine exhaust hood using Kriging surrogate model. *International communications in heat and mass transfer*, 2010, vol. 37, no. 8, pp. 998–1003.

17. St'astny, M., Kolar, P., Tucek, A. 3D flow in the axialradial exhaust hood of a steam turbine. *Journal of Thermal Science*, 1997, vol. 6, no. 4, pp. 237–240.

18. Ris, V.V., Smirnov, E.M., Kirillov, A.I. Numerical simulation of flow in a steam-turbine exhaust hood: Comparison results of calculations and data from a full-scale experiment. *Thermal Engineering*, 2009, no. 56, pp. 277–283.