

УДК 62.135

В. Г. Солодов, д-р техн. наук^{*}**В. Г. Субботин**, канд. экон. наук^{**}**Е. В. Левченко**, канд. техн. наук^{**}**В. Л. Швецов**^{**}**В. А. Конев**^{**}**А. С. Альперт**^{**}

^{*} Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
(E-mail: solodov@khadi.kharkov.ua)

^{**} ОАО «ТУРБОАТОМ»
(г. Харьков, E-mail: office@turboatom.com.ua)

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ, ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТСЕКА «ЦСД-ЦНД-1» ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-325-23,5

На основании численных исследований газодинамических и энергетических характеристик вязкого турбулентного течения выполнена модернизация выходного отсека цилиндра среднего давления (ЦСД) паровой турбины К-325-23,5, включающего последнюю ступень ЦСД, первую ступень первого потока низкого давления (НД1), камеру отбора и участки ресиверов. В перечень объектов модернизации вошли ступени СД, НД1 и элементы организации течения в камере отбора. Обсуждается влияние формообразования элементов проточной части отсека на структуру течения, газодинамические и энергетические характеристики отсека.

На підставі чисельних досліджень газодинамічних і енергетичних характеристик в'язкої турбулентної течії виконано модернізацію вихідного відсіку циліндра середнього тиску (ЦСТ) парової турбіни К-325-23,5, складеного з останнього ступеня ЦСТ, першого ступеня першого потоку низького тиску (НТ1), камери відбору і ділянок ресиверів. До переліку об'єктів модернізації увійшли ступені СТ, НТ1 і елементи упорядкування течії у камері відбору. Обговорюється вплив формоутворення елементів проточної частини відсіку на структуру течії, газодинамічні та енергетичні характеристики відсіку.

Введение

Данная статья является развитием публикации авторов [1]. Рассматриваются результаты исследования влияния новых конструктивных решений на совершенствование газодинамических и энергетических характеристик выходного отсека ЦСД.

Проточная часть исходного отсека включает последнюю ступень СД, первую ступень первого потока НД1, камеру отбора и участки ресиверов. Проточная часть модернизированного по результатам [1] отсека (рис. 1) включает модернизированные ступени СД и НД1 – 1, 6, исходную камеру отбора 3 и участки ресиверов 4, а также элементы организации течения в камере отбора (КО) от ступени СД и ступени НД1 5, и в кольцевой струе отбора на ЦНД 2.

Цель работы, постановка задачи и метод исследования

В данной работе рассматривается численное решение задачи об установившемся вязком турбулентном течении пара через отсек на стационарном режиме с использованием секторного подхода [2]. В работе [1] выявлены недостатки в организации проточной части отсека, определившие повышенные потери в ее элементах. Настоящая работа посвящена ис-

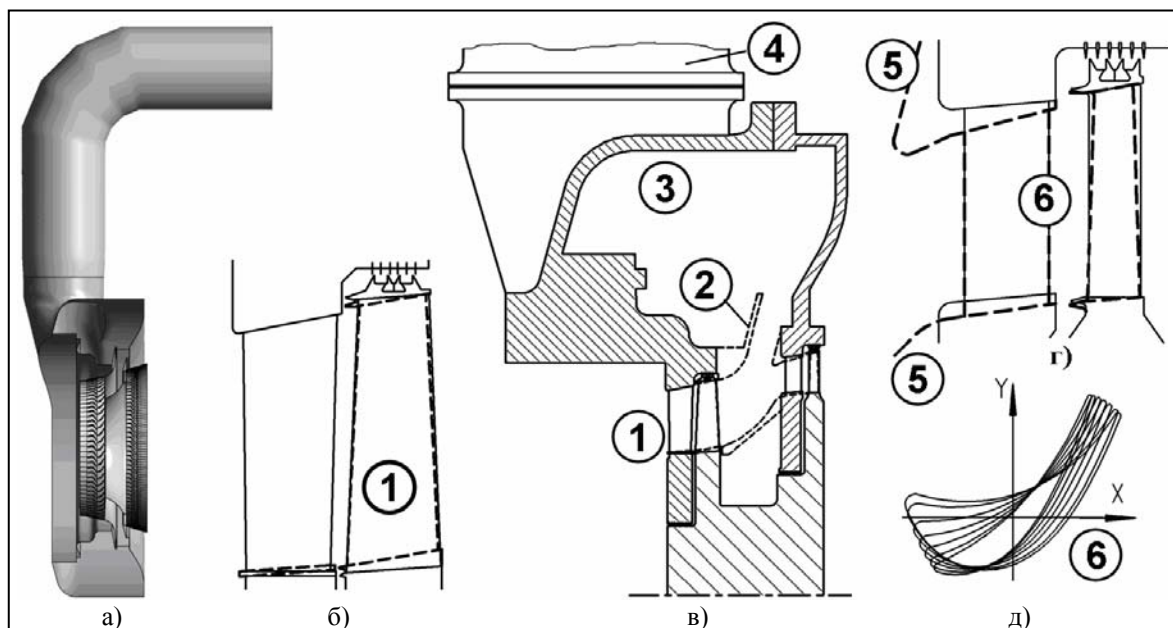


Рис. 1. Схема выходного отсека, мероприятий по модернизации:

а) – пространственная твердотельная модель отсека; б) – меридиональная проекция модернизированной ступени СД; в) – меридиональная проекция отсека с камерой отбора; г) – меридиональная проекция модернизированной ступени НД1; д) – вид сверху на направляющую лопатку НД1

следованию новых решений по совершенствованию ступеней СД и НД1 и формообразованию дополнительных элементов с целью повышения экономичности турбины.

2 Численное решение газодинамической задачи

В расчетной области выходного отсека рассматривается течение пара, которое описывается системой нестационарных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу–Фавру. Исследование выполнено с помощью программного комплекса *MTFS® software* [3]. Турбулентные эффекты учитываются комбинированно с помощью дифференциальных моделей турбулентности Спаларта–Аллмараса (область камеры отбора и ресиверов) и SST Ментера (каналы ступеней) [4]. Параметры сеток даны в работе [1].

Интегральные массовые и энергетические характеристики элементов вычислялись по характерным сечениям отсека [1]. Порядок их обработки описан в [1].

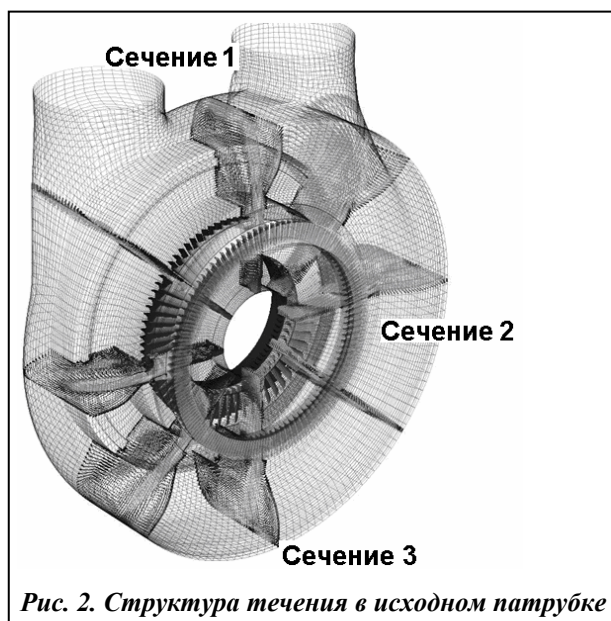


Рис. 2. Структура течения в исходном патрубке

Направления модернизации и их сравнительный численный анализ

В модернизированной ступени СД увеличены отношение D_p/l_p с величины с 5,08 до 5,47 за счет увеличения корневого диаметра и уменьшения высоты лопатки, а также наклон меридиональных обводов до 10° . Это позволило устранить закрутку потока за ступенью и увеличить отклонение потока в радиальном направлении. Параметры ступени на среднем радиусе имеют следующие значения: высота сопел $\bar{l}_c = 2,60$, рабочих лопаток $\bar{l}_p = 2,90$; относительные шаги $\bar{t}_c = 0,458$, $\bar{t}_p = 0,77$, толщины кромок $\Delta_c = 0,36$ мм, $\Delta_p = 1,05$ мм;

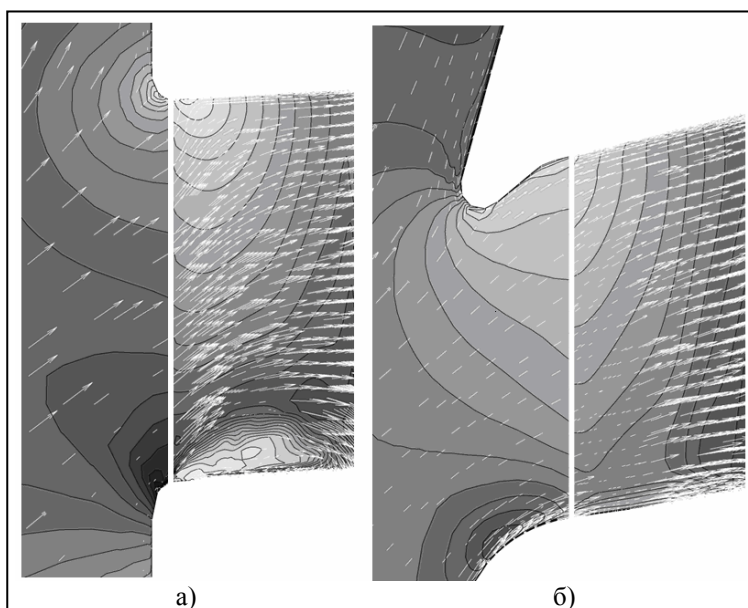


Рис. 3. Структура течения и поле скоростей на входе в сопловую решетку:
а) в исходном; б) – модернизированном патрубке

отношение чисел лопаток $Z_C:Z_P = 82:60$.

Ступень НД1 подверглась более существенной модернизации с целью устранения корневого отрыва в сопловой решетке и уменьшения потерь как в сопловой, так и в рабочей решетках. Для этого увеличены углы наклона меридиональных обводов в сопловой решетке в корне на 3° и на периферии на 10° , а также в корне рабочей решетки на 4° . Сформирован подвод потока к соплам путем существенного уменьшения кривизны входной кромки тела диафрагмы и удлинения входной кромки обода диафрагмы, а также с помощью установки профилированного кольца для направления транзитного потока

и отделения его от зоны вихревых течений. Рабочая лопатка выполнена с переменным профилем вдоль радиуса. В итоге параметры ступени НД1 на среднем радиусе такие: высота диафрагмы $\bar{l}_C = 1,86$ и лопатки $\bar{l}_P = 4,02$, относительные шаги $\bar{t}_C = 0,67$, $\bar{t}_P = 0,73$, толщины кромок $\Delta_C = 0,32$ мм, $\Delta_P = 0,5$ мм; $Z_C:Z_P = 106:196$.

Структура течения в исходном патрубке представлена на рис. 2.

Некоторые основные результаты модернизации отсека показаны на рис. 3–5.

Модернизированная ступень СД обеспечивает практически осевой выход потока и окружной КПД на уровне исходной ступени, несмотря на увеличение радиальности в рабочей решетке.

Эвристический поиск формы направляющей втулки и разделителя потоков на входе в ступень НД1 позволил из серии модификаций выбрать рациональный вариант в рамках технологических ограничений (рис. 1, 3, б; 4, б) из соображений обеспечения минимальной

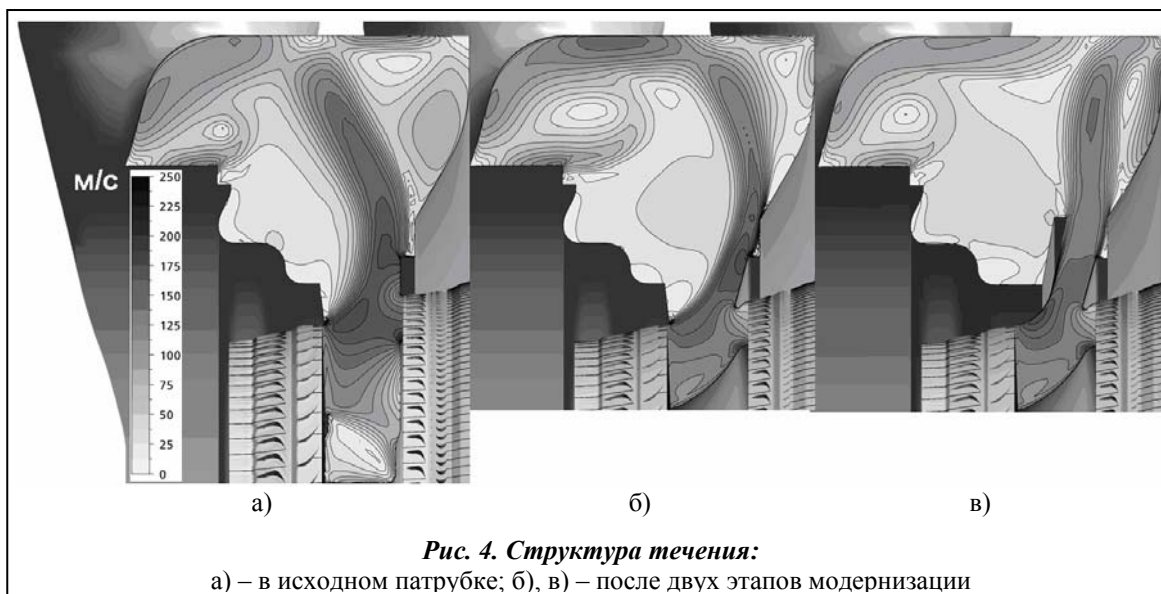


Рис. 4. Структура течения:
а) – в исходном патрубке; б), в) – после двух этапов модернизации

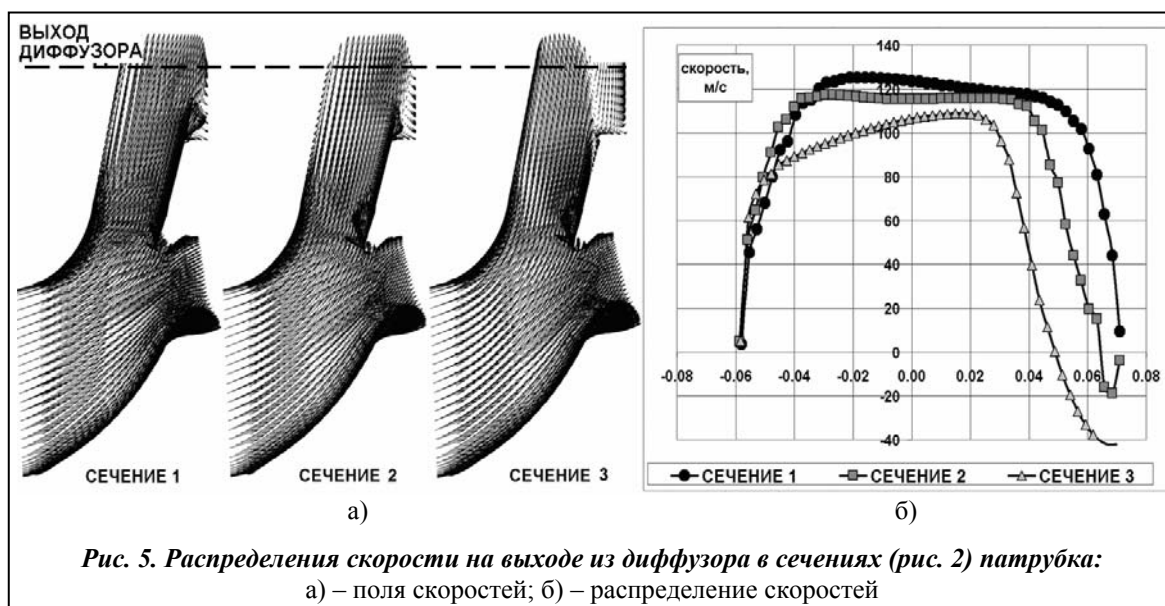


Рис. 5. Распределения скорости на выходе из диффузора в сечениях (рис. 2) патрубка: а) – поля скоростей; б) – распределение скоростей

неравномерности поля скоростей на входе в ступень НД1 и безотрывного течения в корневой зоне сопловой решетки. В результате наиболее эффективный вариант формы в сочетании со специальным профилированием входа в диафрагму ступени НД1 показал уменьшение коэффициента потерь полного давления в потоке от ступени СД до ступени НД1 с 0,18 до 0,04, т.е. в 4,5 раза. Значительно улучшились условия работы первой ступени НД1. Исчезновение закрутки течения за ступенью СД снизило углы атаки сопловых лопаток ступени НД1. Существенно уменьшился меридиональный угол течения на входе в сопла НД1, течение практически стало безотрывным, что снизило интенсивность подковообразного вихря и канального вихря в рабочем венце. В итоге потери кинетической энергии на ступени НД1 снизились в соплах с 5,3 до 3,7%, в каналах рабочей решетки с 7,7 до 5,1%.

Потери полного давления на тракте «ЦСД–КО», которые достигали значения $\xi_{\text{пд}} \approx 1,5$, а также характеристики нестационарности в КО в сравнении с исходным вариантом отсека практически не изменились. Учитывая, однако, что потери в камере отбора составляют основную часть потерь в тракте от ступени СД до первых ступеней двухпоточного ЦНД (около 77%), снижение данного параметра, как и уровня нестационарности течения, остаются существенным резервом повышения экономичности и надежности турбоагрегата. Поэтому был реализован второй этап модернизации отсека, заключающийся в организации диффузорного течения в потоке отбора. Вогнутый обвод осерадиального диффузора с принятой конструктивно радиальностью $\bar{D}_2 = 1,4$ образован разделительной поверхностью тока между потоками в НД и в отбор, торцом обода диафрагмы НД1 и участком обоймы. Выпуклый обвод образован специальной профилированной кольцевой обечайкой (рис. 1, 4, в). Из серии исследованных диффузоров в системе отсека наилучшие результаты показал диффузор со степенью расширения $A_{\text{вых}}/A_{\text{вх}} = 1,3$.

Расчеты показали, что данный вариант реализует безотрывное течение на верхней половине дуги выхлопа (рис. 5) с максимальным для серии интегральным коэффициентом восстановления давления [5, 6] $\xi = 0,24$. На нижней дуге (вдали от ресиверов) выхлопной патрубков имеет отрывную область вблизи выходной границы диффузора в связи с конструктивными особенностями, обода диафрагмы, что указывает на наличие резерва совершенствования, например, внедрение диффузора с переменной вдоль окружности площадью выхлопа.

Струя за диффузором в камере отбора остается нестационарной, однако ее кинетическая энергия и размах колебаний параметров заметно ниже, чем в исходном варианте модернизированного отсека. Кроме того, колебания полей давления, скорости из КО практически не проникают в кольцевую транзитную струю от ступени СД до НД1.

Для выбранного варианта диффузора коэффициент потерь полного давления на тракте от выхлопа верхней части ступени СД до входа в ресиверы составил $\xi_{\text{ПД}} \approx 0,81$, что почти в 2 раза ниже, чем в исходном варианте. При этом аэродинамические и энергетические характеристики ступеней СД, НД1 не изменились, а потери полного давления от ступени СД до ступени НД1 снизились на 15%.

Заключение

На примере турбины К-325-23,5 поставлена и решена задача о совершенствовании газодинамических и энергетических характеристик выходного отсека ЦСД мощной паровой турбины. Показана целесообразность применения предложенных мероприятий по модернизации отсека.

Литература

1. Солодов В. Г. Численный анализ аэродинамических и энергетических характеристик отсека «ЦСД–ЦНД-1» паровой турбины К-325-23,5 / В. Г. Солодов, А. А. Хандримайлов, В. Г. Субботин, Е. В. Левченко, В. Л. Швецов, В. А. Конев // Пробл. машиностроения. – 2009. – 12, № 6. – С. 3–8.
2. Solodov V. G. Nonstationary 3D Numerical Model of Last Turbine Stage-Exhaust Hood Aerodynamical Interaction / V. G. Solodov, V. I Gnesin // VDI Berichte – 1995. – № 1185, – P. 359–370.
3. Солодов В. Г. Научно-прикладной программный комплекс *MTFS*[®] для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы / В. Г. Солодов, Ю. В. Стародубцев // Сертификат гос. регистр. авторских прав. – УГААСП. – № 5921. – 07.16.02.
4. Starodubtsev Yu. V. Numerical 3D Model of Viscous Turbulent Flow in One Stage Gas Turbine and Its Experimental Validation / Yu. V. Starodubtsev, I. G. Gogolev, V. G. Solodov // J. Thermal Sci. – 2005. – 14, № 2. – P. 136–141.
5. *Аэродинамические* характеристики ступеней тепловых турбин / Под ред. В. А. Черникова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 262 с.
6. Мигай В. К. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин / В. К. Мигай, Э. И. Гудков – Л.: Машиностроение, 1981. – 272 с.

Поступила в редакцию
25.09.09