

УДК 62.135

В. Л. ШВЕЦОВ, канд. техн. наук; главный конструктор паровых турбин ОАО «Турбоатом», Харьков;
И. И. КОЖЕШКУРТ, начальник отдела ОАО «Турбоатом», Харьков;
В. А. КОНЕВ, вед.инж.-констр. ОАО «Турбоатом», Харьков;
В. Г. СОЛОДОВ, д-р техн. наук, проф.; проф. ХНАДУ, Харьков;
А. А. ХАНДРИМАЙЛОВ, канд. техн. наук, доц.; доц. ХНАДУ, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫХЛОПНОГО ОТСЕКА ЦНД В ДИАПАЗОНЕ РЕЖИМОВ

Выполнено численное исследование аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека мощной паровой турбины в составе «последняя ступень ЦНД – выхлопной патрубок – камера удаления влаги – переходный патрубок» в диапазоне режимов. Обсуждаются структура течения и характеристики отсека на номинальном и частичных режимах, эффект инжекции и надбандажной протечки в зависимости от режима. Показана низкая эффективность инжекции в условиях неосевого выхода пара из последней ступени.

Ключевые слова: последняя ступень ЦНД, осерадиальный диффузор, выхлопной патрубок, система влагоудаления, влажный пар, численное моделирование, частичные режимы.

Введение

Статья посвящена численному исследованию аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД мощной паровой турбины в составе последней ступени, выхлопного патрубка, переходного патрубка, камеры отсека влаги на серии режимов с использованием свойств влажного пара. Работа использует модель влажнопарового потока через выхлопной отсек ЦНД, описанную в [1]. Исследование проведено расчётным методом с использованием программного комплекса *MTFS*[®].

1 Краткое описание объекта исследования и особенности численной модели

Выхлопной отсек ЦНД включает последнюю ступень, выхлопной патрубок с осерадиальным диффузором, камеру для сбора влаги и переходный патрубок (рис. 1, 2). Характерными особенностями ступени являются «обратная закрутка» сопловых лопаток, цельнофрезерованный полочный бандаж, одна промежуточная демпферная связь и развитая система влагоудаления. Рабочее колесо уплотнено надбандажным кольцом. Описание конструкции элементов отсека дано в [1]. Некоторые основные данные отсека: высота сопла 1034 мм, угол периферийного меридионального раскрытия 40°; высота рабочей лопатки (РЛ) 1100 мм, веерность РЛ – 2,73; степени расширения: осерадиального диффузора – 2,3, патрубка – 2,0; частота вращения ротора 50 с⁻¹.

Канал осерадиального диффузора образован поверхностями обтекателя и обечайки. Обечайка диффузора состоит из трёх частей: профилированного надбандажного кольца, конической части с образованием между ними кольцевой камеры для размещения форсунок системы охлаждения. Третья часть обечайки в виде фрагмента тора, расположена по отношению ко второй части с зазором для инжекции пара, уходящего из межвенцового зазора ступени через кольцевые щели влагоудаления. Выхлопной (ВП) и переходный (ПП) патрубки описаны в [1], содержат стержневую систему жесткости и трубный массив.

© В.Л. Швецов, И.И. Кожешкурт, В.А. Конев, В.Г. Солодов, А.А. Хандримайлов, 2015

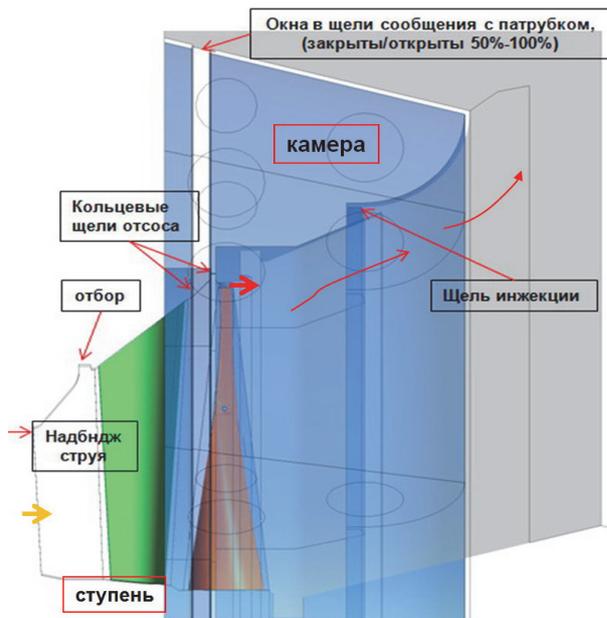


Рис. 1 – Схема проточной части отсека ЦНД

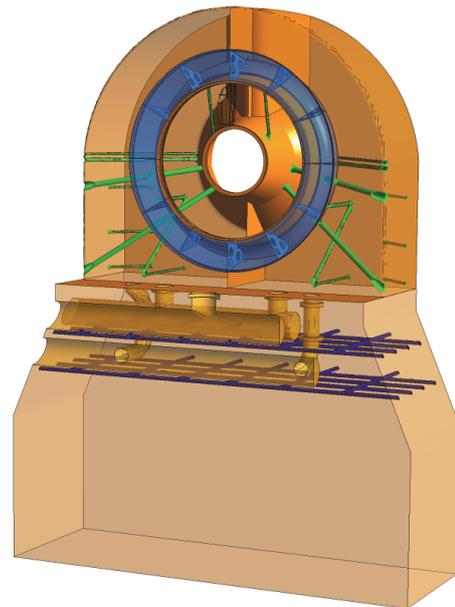


Рис. 2 – Модель ВП и ПП

При моделировании рассчитывалось течение через ступень в стационарной постановке с осреднением в межвенцовом зазоре на основе односекторной модели взаимодействия ступени и патрубком. Модель ступени описана в [1, 2] и содержит периферийный отбор пара перед диафрагмой ступени с заданным расходом, два периферийных кольцевых отсоса пара и влаги в межвенцовом зазоре, направляемые в камеру патрубком, периферийный бандаж, надбандажный зазор, и проволочную демпферную связь. Все особенности геометрии ступени смоделированы в полном объеме, включая утолщение рабочей лопатки вблизи демпферной связи.

Вход в модель ступени организован из двух частей: вход в ядро потока основан на данных теплового расчета, надбандажная протечка предвключенной ступени задается по данным теплового расчета на основании полных параметров и направления вектора скорости. Между ядром потока на входе и надбандажной протечкой выставляется стенка, совпадающая по размерам с бандажом предвключенной ступени.

Модель выхлопного патрубком [1] содержит собственно ВП (рис. 2), осерадиальный диффузор (ДФ), и переходный патрубком к конденсатору. Модель ВП дополняется моделью кольцевой камеры для сброса влаги и пара из межвенцового зазора ступени со щелью на обечайке диффузора для инъекции пара в проточную часть диффузора, и содержит поперечные стенки жесткости с промежуточными окнами для перетекания пара в окружном направлении. Камера также содержит открытые перепускные окна вдоль окружной координаты для сообщения с пространством патрубком за ДФ.

Течение в каждой расчетной подобласти описывается полной системой нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу-Фавру. Система дополняется дифференциальными уравнениями модели турбулентности. Интегрирование системы уравнений Навье-Стокса и ассоциированных уравнений осуществляется с помощью программного комплекса *MTFS*[®] [4–6]. Мощности сеточного разбиения составили около 20 млн. ячеек для обеспечения параметра погранслоя $Y^+ < 2$ в области ступени и $Y^+ < 5$ в области патрубком.

2 Результаты исследований и обсуждение (рис. 3–6)

Расчеты выхлопного отсека выполнялись при задании на входе осесимметричных радиальных распределений давления и температуры торможения, влажности и направления вектора скорости, в выходном сечении переходного патрубка – статического давления в конденсаторе по данным тепловых расчетов ОАО «Турбоатом». Учитывались параметры закрученной струи надбандажной протечки из уплотнения предвключенной ступени. Исследована серия режимов четырехступенчатого отсека L4. Данные по режиму L4-1 (с открытыми окнами) заимствованы из [1]. Для режимов реализовывался заданный отбор пара на периферии входа перед диафрагмой ступени. Входная струя надбандажной протечки для всех режимов задавалась закрученной под углом 50° к оси турбины. Полные параметры струи надбандажной протечки из предвключенной ступени варьировались для разных режимов на основании данных теплового расчета ОАО «Турбоатом».

Таблица 1.

Расходные характеристики исследованных вариантов

Расходы кг/сек	Отсек L4-1 окна откр.	Отсек L4 100 % G	Отсек L4 80 % G	Отсек L4 60 % G	Отсек L4 40 % G
Вход в ступень	52,80	53,83	43,79	32,84	22,05
Вх. надбанд. струя	0,46	0,559	0,459	0,24	0,0598
Отбор	1,67	1,76	1,669	0,5997	0,06
Отсос № 1	0,679	0,674	0,543	0,42	0,2594
Отсос № 2	2,92	2,903	2,35	1,84	1,24
Вых. надбанд. струя	1,416	1,312	1,063	0,8349	0,508
Вых, Ступени + надбанд. струя	49,2	48,993	39,714	30,24	20,571
Инжекция	1,74	1,672	1,35	1,121	0,845
Выход ДФ	50,74	50,67	40,83	31,057	21,58
Выход ВП	52,5	54,1	36,988	32,25–34,4	20,97–23,4
Выход ПП	52,5	54,9	38,62	31,27	22,64
Давление конд.	2942 Па	2942 Па	2844 Па	2844 Па	2844 Па

Таблица 2.

Газодинамические и энергетические характеристики ступени в составе отсека

Режим	расход кг/с	потери отн. перепада на ступень		Реакция ср. радиус	Потери вых. ск.	α_2 ср. радиус
		статор	ротор			
L4-100	53,83	0,0476	0,0358	0,4385	0,1338	112,64
L4-1 [1]	52,80	0,0432	0,0330	0,4709	0,1365	106,10
L4-80	43,79	0,0540	0,0440	0,3578	0,1455	130,41
L4-60	32,84	0,0622	0,0552	0,2495	0,2756	151,25
L4-40	22,05	0,0807	0,1080	0,1117	0,6466	159,60

Режим L4-100 отсека. Перепад на отсек определяется средним полным давлением на входе в ступень около 13850 Па при давлении в конденсаторе 2940 Па. Ступень работает на режиме, близком к номинальному, при $GV_2 = 2075 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 3, 4).

Потери КЭ, отнесённые к располагаемому перепаду на ступень, в соплах составляют 4,76 %, на рабочих каналах – 3,58 %. Потери с выходной скоростью составляют 13,38 %. Течение в сопловых каналах характеризуется небольшим отрывом вблизи вытеснителя разной направленности вдоль радиуса. Периферийная область вблизи отбора наполнена низкоскоростным потоком. В среднем поясе РЛ отмечена область пониженных скоростей, которая связана с ударом в животик РЛ. Среднее значение влажности за кромками РК составляет 13,3 %. Осреднённая по расходу скорость на входе в диффузор составляет 0,614 М (234,2 м/с). Поток на входе в ДФ закручен, угол $\alpha_2 \sim 112^\circ$ в ядре входного течения. Данный режим отличается от режима L4-1 увеличенным α_2 на 6° . Проволочная демпферная связь обтекает с дорожкой вихрей и создаёт локальные потери КЭ в данном поясе. Дефект скорости от системы демпферной связи сохраняется на протяжении всего канала диффузора.

Надбандажная протечка реализуется со средним вдоль окружности числом Маха на выходе из надбандажной щели около 1,7 М. На обечайке диффузора струя разгоняется, прилегает к поверхности козырька, теряя скорость до околосвуковых величин, прилипает к конической части обечайки диффузора. Струя инжекции подсасывает основной поток, и отрыва от обечайки не происходит. Отрыв незначительной протяженности наступает в конце криволинейной оболочки диффузора. Таким образом, надбандажная протечка и струя инжекции в совокупности с закруткой потока стабилизируют обтекание внешней оболочки диффузора. Однако центробежный эффект от закрутки приводит и к негативным явлениям, как то: а) отрыв потока в окружном направлении от стенок выемки для доступа к валу в верхней части ВП; б) неустойчивый отрыв потока от втулки диффузора в радиальном направлении, который происходит вблизи первого излома втулки. По ходу потока в ДФ отрыв интенсифицируется, особенно вблизи второго излома втулки. Отрывные области нестационарны и создают пульсацию расхода пара в выхлопном сечении патрубка.

В диффузоре поток тормозится до средней скорости на выходной цилиндрической поверхности 0,353 М (при давлении 3160 Па). На выходе из переходного патрубка поток теряет скорость до 0,187 М при давлении 2931 Па и средней расходной составляющей скорости 70,2 м/с. Расход инжекции в диффузор достигает 1,67 кг/с. Расход через окна в сборную камеру составляет 1,905 кг/с при общем расходе отсоса влажного пара 3,575 кг/с. Структура потока в патрубке несимметрична относительно плоскости геометрической симметрии ВП вследствие закрутки на входе. Осреднённое по расходу динамическое давление $0,5\rho C^2$ на входе в диффузор составляет около 632 Па, динамическое давление инжекции на выходе из щели оценивается в 650 Па.

Полное давление в диффузоре патрубка восстанавливается со средним коэффициентом полных потерь около $0,57 \pm 0,01$ (рис. 6а). Локальный рост полных потерь за кольцом инжекции объясняется поступлением высокоскоростной струи пара. Оценка внутренних потерь до кольца инжекции даёт значения 0,075. После выходного сечения диффузора наблюдается скачок коэффициента из-за потерь в сборной камере ВП.

Режим L4-80 отсека (рис. 5а). Перепад на отсек определяется средним полным давлением на входе в ступень около 11250 Па при давлении в конденсаторе 2840 Па. Ступень работает при $GV_2 = 1630 \pm 30 \text{ м}^3/\text{с}$. Потери КЭ в соплах составляют 5,4 %, на рабочих каналах – 4,4 %. Потери с выходной скоростью составляют 14,5 %. В сравнении с режимом L4-100 в корневом поясе выходной части канала РЛ наблюдается небольшой отрыв потока от втулки, который далее развивается вблизи втулки ДФ.

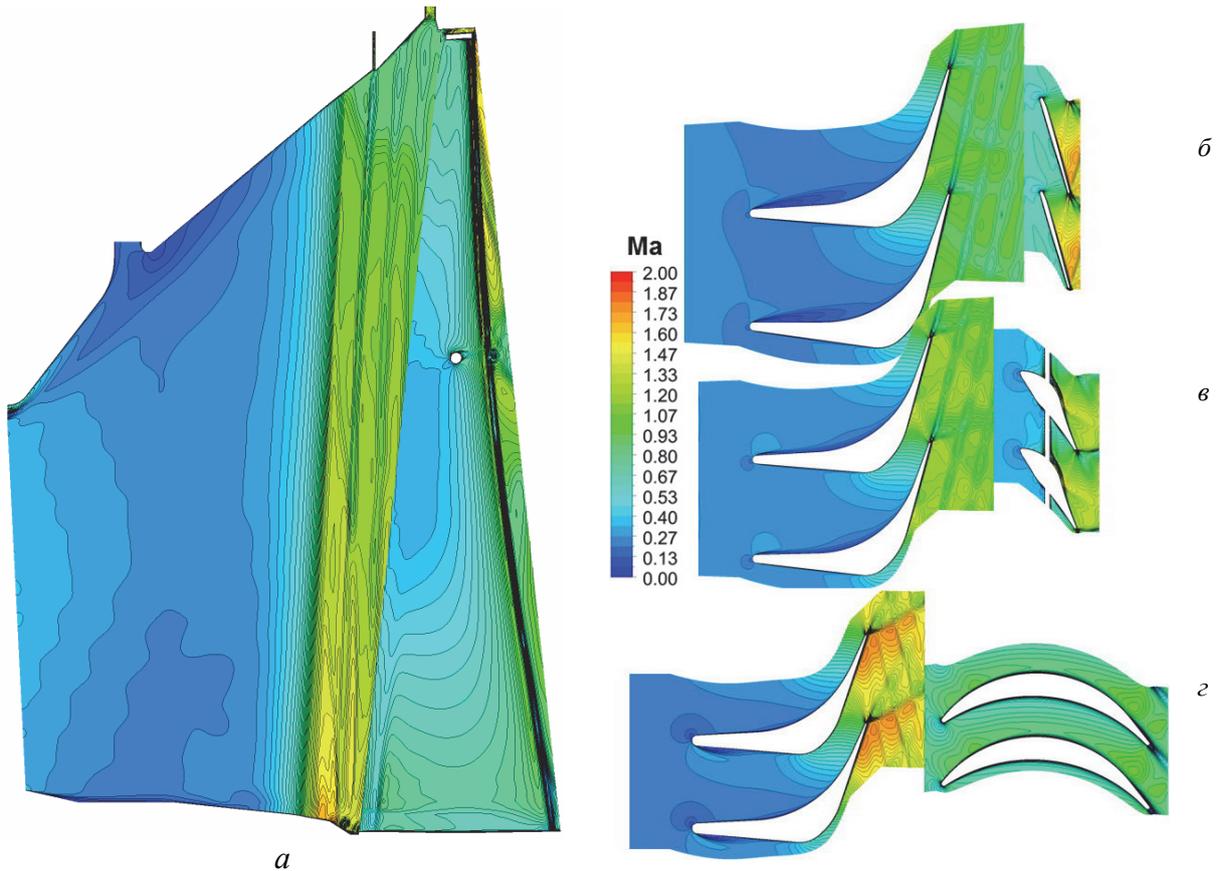


Рис. 3 – Поля относительных чисел Маха ступени на режиме L4-100:
a – в меридиональном сечении; *б, в, г* – в радиальных сечениях

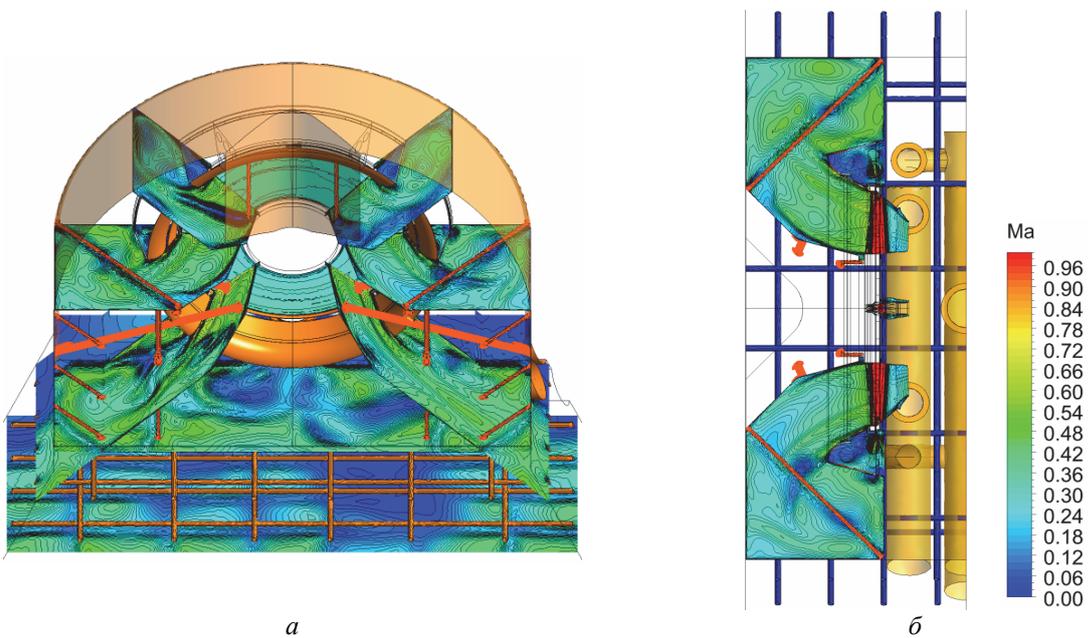


Рис. 4 – Поля абсолютных чисел Маха в ДФ и сборной камере для режима L4-100:
a – в сечениях ВП; *б* – в сечении горизонтального разреза

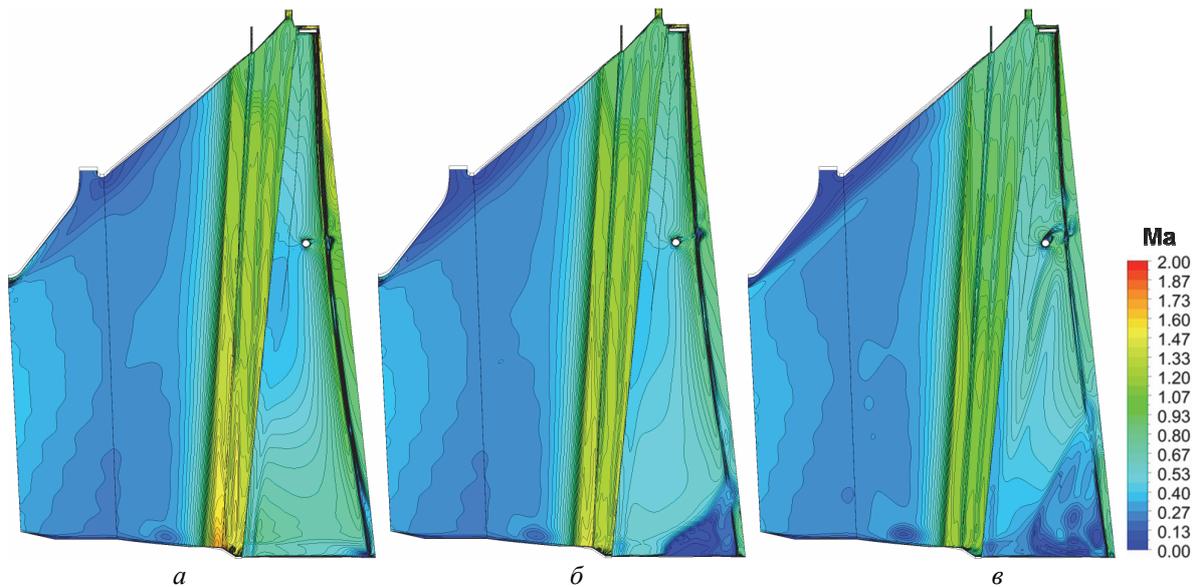


Рис. 5 – Поля относительных чисел Маха на среднеканальной поверхности ступени на режимах: *а* – L4-80; *б* – L4-60; *в* – L4-40

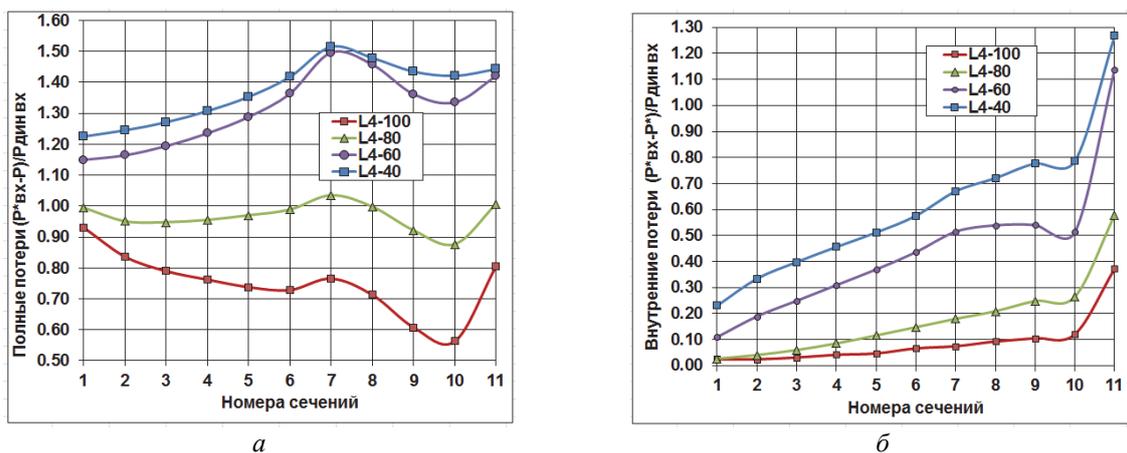


Рис. 6 – Распределения в ВП по сечениям ДФ: *а* – полных потерь; *б* – внутренних потерь; 11 – сечение выхлопа ВП

Среднее значение влажности за кромками РК составляет 12,0 %. Среднемассовая скорость на входе в ДФ составляет 0,578 М (222,9 м/с). Расходная составляющая скорости составляет 164,6 м/с, статическое давление 2803 Па. Поток на входе в ДФ закручен со средним углом $\alpha_2 \sim 130^\circ$. Течение в ступени приобретает слабо выраженный диагональный характер.

Среднерасходное по окружности число Маха на выходе из надбандажной щели – около 1,59 М, на обечайке диффузора струя локально разгоняется и прилегает к конической части обечайки диффузора. После щели инъекции струя подсасывает основной поток, однако на последней трети выпуклой оболочки ДФ возникает отрыв от обечайки. На данном режиме надбандажная протечка и струя инъекции играют незначительную роль в стабилизации обтекания внешней оболочки ДФ вследствие доминирующей закрутки в ядре потока.

Центробежный эффект от закрутки приводит к отрыву потока от стенки выемки в верхней части ВП; отрыву от поддерживающей стенки в нижней части ВП; неустойчивому отрыву потока от втулки на входе в ДФ. По потоку отрыв в ДФ

интенсифицируется, вблизи второго излома втулки занимает до 50 % меридионального сечения диффузора. Отрывные зоны приводят к пульсации расхода пара в диффузоре и через выхлопное сечение патрубка. Степень наполненности диффузора определяется отрывными факторами, стимулированными закруткой потока в ядре.

В диффузоре поток тормозится от средней скорости на входе 0,578 М (при давлении 2803 Па) до средней скорости на выходной цилиндрической поверхности диффузора 0,39 М (при давлении 3014 Па). В сечении выхода ВП поток движется со среднемассовой скоростью 0,349 М (135,5 м/с) при восстановлении давления до 2930 Па.

На выходе из переходного патрубка поток теряет скорость до 0,132 М (52,4 м/с) при давлении 2825 Па и средней расходной составляющей скорости 50,5 м/с. Разница между давлением в конденсаторе в 115 Па связана с нестационарностью в переходном патрубке. Расход инжекции в диффузор достигает 1,35 кг/с, расход через окна в сборную камеру составляет $1,56 \pm 0,02$ кг/с при общем расходе отсоса влажного пара 2,89 кг/с. Динамическое давление на входе в диффузор составляет 579 Па, динамическое давление инжекции вблизи выхода из щели – 452 Па. Полное давление в диффузоре патрубка восстанавливается со средним коэффициентом полных потерь около $0,88 \pm 0,05$. После выходного сечения ДФ наблюдается скачок коэффициента из-за потерь в сборной камере ВП (рис. 6а, б).

Режим L4-60 отсека (рис. 5б). Перепад на отсек определяется средним полным давлением на входе в ступень около 8750 Па при давлении в конденсаторе 2844 Па и объемном расходе на выходе около $1165 \text{ м}^3/\text{с}$. Потери КЭ, отнесенные к располагаемому перепаду на ступень, в соплах составляют 6,22 %, на рабочих каналах – 5,52 %. Потери с выходной скоростью составляют 27,6 %. В корневом поясе с середины канала РЛ наблюдается отрыв потока от втулки высотой 12 % длины лопатки, который переходит в развитый отрыв потока от втулочной поверхности диффузора. В среднем поясе РЛ область пониженных скоростей, которая на режимах, близких к номинальному, связана с ударом потока в животик РЛ, заметно уменьшена из-за уменьшения угла атаки кромок вследствие диагональности структуры. Поток на входе в ДФ закручен со средним углом α_2 около 151 град, структура потока диагональная со средним меридиональным углом около 38,2 град, средняя влажность – 10,04 %.

Среднерасходное число Маха на выходе из надбандажной щели составляет около 1,22 М. Отрыв струи инжекции от обечайки происходит на середине выпуклой оболочки диффузора и является более интенсивным, чем для режима **L4-80**. В целом, надбандажная протечка и струя инжекции незначительно стабилизируют обтекание внешней оболочки диффузора вследствие интенсивной закрутки ядра потока. Центробежный эффект от закрутки приводит к более негативным явлениям в сравнении с режимом **L4-80**. К ним относятся: а) отрыв потока от стенки выемки доступа к валу в верхней части ВП; б) отрыв потока от стенки в нижней части ВП; в) отрыв потока от втулки диффузора, занимающий около 2/3 меридионального сечения диффузора. Диагональная структура в диффузоре приводит к некоторой стабилизации границ отрывных областей. Это обстоятельство несколько снижает уровень нестационарности расхода на выхлопе в сравнении с режимом **L4-80**.

В диффузоре поток тормозится от средней скорости на входе 0,657 М (при давлении 3103 Па) до средней скорости на выходной цилиндрической поверхности диффузора 0,537 М (при давлении 2922 Па). В сечении выхода ВП поток движется со среднемассовой скоростью 0,393 М (155,4 м/с) при давлении до 2873 Па. На выходе из

переходного патрубка поток теряет скорость до 0,114 М (45,6 м/с) при давлении 2840 Па и средней расходной составляющей скорости 43,3 м/с. Разница между давлением в конденсаторе в 100 Па связана с нестационарностью в переходном патрубке. Осредненное динамическое давление на входе в диффузор составляет 837 Па, оценка среднего динамического давления инъекции около 310 Па. Коэффициент потерь полного давления в диффузоре 1,32, в патрубке в среднем около $1,4 \pm 0,1$.

Режим L4-40 отсека (рис. 5в). Перепад на отсек на частичном режиме **L4-40** определяется средним полным давлением на входе в ступень около 5850 Па при давлении в конденсаторе 2844 Па. Ступень работает при объемном расходе на выходе около 820 м³/с. Потери КЭ в соплах составляют 8,07 %, на рабочих каналах – 10,8 %. Потери с выходной скоростью составляют 64,6 %. Поток на входе в ДФ сильно закручен, средний угол $\alpha_2 \sim 159^\circ$ в ядре входного течения, структура потока диагональная со средним меридиональным углом около 49,1°, средняя влажность – 7,65 %.

Среднерасходное число Маха на выходе из надбандажной щели составляет около 0,86 М, отрыв от обечайки происходит на середине выпуклой оболочки диффузора и является более интенсивным, чем для режима **L4-60**. Надбандажная протечка и струя инъекции не являются стабилизирующими факторами при обтекании внешней оболочки ДФ вследствие интенсивной закрутки потока. Диагональная структура приводит к стабилизации границ отрывных областей в диффузоре, пространство сборной камеры не заполнено, существуют значительные градиенты скорости.

В диффузоре поток тормозится от средней скорости на входе 0,749 М при давлении 3080 Па до средней скорости на выходной цилиндрической поверхности диффузора 0,534 М (при давлении 2846 Па) В сечении выхода ВП (перед уступом переходного патрубка) поток движется со среднемассовой скоростью 0,35 М при давлении до 2838 Па. На выходе из переходного патрубка поток теряет скорость до 0,104 М (42 м/с) при давлении 2837 Па и средней расходной составляющей скорости 39 м/с. Среднее динамическое давление на входе в диффузор составляет 1093 Па, динамическое давление инъекции является низким и не создает эффекта. Течение в ДФ сопровождается значительными полными и внутренними потерями (рис. 5, 6). В корневом поясе с середины канала РЛ наблюдается отрыв потока от втулки высотой ~25 % длины лопатки, который переходит в отрыв потока от втулки ДФ.

3 Сравнение работы отсеков на режимах L4-100 и L4_1 [1] с включением инъекции и без инъекции

Режим **L4-100** с закрытой щелью инъекции показывает близкие значения параметров потока и потери в ДФ к режиму **L4-100** с инъекцией. Отличия в основном лежат в диапазоне погрешности расчета в связи с нестационарностью. Течение в ДФ прижато к обечайке в связи с закруткой потока и из-за интенсивной струи надбандажной протечки. Динамический импульс струи инъекции не влияет на стабилизацию потока в ДФ к обечайке.

Режим **L4_1** без инъекции по результатам расчетов показывает несколько отличные значения параметров потока и потери в ДФ по отношению к режиму **L4_1** с инъекцией, описанному подробно в работе [1]. Потери в сечении выхода ВП при отсутствии инъекции возрастают на 12 % \pm 1 % по причине снижения эффекта прижатия течения в ДФ к обечайке в связи с меньшей закруткой ядра потока. Интенсивность и действие струи надбандажной протечки близки к аналогичной струе для режима **L4-100**. Таким образом, незначительное изменение рабочей точки отсека

изменяет закрутку потока за ступенью и, как следствие, чувствительность потока к внешнему воздействию возрастает.

Все описанные выше численные исследования режимов выполнены без загромождения сборной камеры ВП стержнями жесткости, но при наличии в переходном патрубке системы труб и решетки стержней. Учет стержней жесткости в сборной камере ВП, выполненный для режима **L4-100**, показал повышение коэффициента полных потерь на 10,5 %.

Заклучение

Потери полного давления в диффузоре и патрубке существенно зависят от закрутки потока за ступенью, т.е. от режима работы ступени. Умеренная закрутка потока за РК улучшает условия обтекания обечайки ДФ дополнительно к эффекту надбандажной и щелевой инжекции, однако нарушает симметричность потока в ВП и порождает отрывные явления. В этой связи оценки эффективности патрубка в статических экспериментах не дают полной информации о работе патрубка в составе отсека на различных режимах.

Применение эффективной инжекции пара в диффузоре целесообразно выполнять с учётом надбандажной утечки пара и режима работы отсека.

Список литературы: 1. *Швецов, В. Л.* Исследование аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД [Текст] / В. Л. Швецов, И. И. Кожешкурт, В. А. Конев, В. Г. Солодов, А. А. Хандримайлов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 15(1124). – С. 41–49. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X. 2. *Швецов, В. Л.* Исследование аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД «ступень-диффузор» [Текст] / В. Л. Швецов, И. И. Кожешкурт, В. А. Конев, В. Г. Солодов, А. А. Хандримайлов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 12(1055). – С. 12–20. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. 3. *Мигаї, В. К.* Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин [Текст] / В. К. Мигаї, Э. И. Гудков. – Ленинград : Машиностроение, 1981. – 272 с. 4. Сертификат гос. регистрации авторских прав № 5921 Украины. Научно-прикладной программный комплекс *MTFS*[®] для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы [Текст] / В. Г. Солодов, Ю. В. Стародубцев ; Украинское Государственное Агентство по авторским и смежным правам. – № 5921; заявл. 24.05.2002; опубл. 17.07.2002. 5. *Солодов, В. Г.* Опыт трехмерного моделирования сжимаемых вязких турбулентных течений в турбомашинах [Текст] / В. Г. Солодов, Ю. В. Стародубцев // Аэрогидродинамика: Проблемы и перспективы. – Харьков : Нац. Аэрокосм. Ун-тет «ХАИ», 2004. – С. 134–157. 6. *Солодов, В. Г.* Уравнения движения химически равновесной газовой смеси с учетом конденсации компонента [Текст] // Проблемы машиностроения. – 1999. – Т. 1, № 1–3. – С. 41–46. (Препринт: Пробл. машиностр. – 2000. – Т. 3, № 1-2. – С. 38–44).

Bibliography (transliterated): 1. Shvecov, V. L., et al. "Issledovanie ajerodinamicheskikh i jenergeticheskikh harakteristik vyhlopnogo отсека CND." Visnik NTU "KhPI". Serija: Energetichni ta teplotehnicni procesi j ustatkuvannja. No 15(1124). Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. 41–49. ISSN 2078-774X. Print. 2. Shvecov, V. L., et al. "Issledovanie ajerodinamicheskikh i jenergeticheskikh harakteristik vyhlopnogo отсека CND "stupen'-diffuzor"." Visnik NTU "KhPI". Serija: Energetichni ta teplotehnicni procesi j ustatkuvannja. No 12(1055). Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. 12–20. ISSN 2078-774X. Print. 3. Migaj, V. K., and Je. I. Gudkov. *Proektirovanie i raschet vyhodnyh diffuzorov turbomashin*. Leningrad : Mashinostroenie, 1981. Print. 4. Solodov, V. G., and Ju. V. Starodubcev. "Nauchno-prikladnoj programmnyj kompleks *MTFS*[®] dlja rascheta trehmernyh vjazkikh turbulentnyh techenij zhidkostej i gazov v oblastjah proizvol'noj formy." *Ukrainy. Ukrainskoe Gosudarstvennoe Agentstvo po avtorskim i smezhnym pravam*. Serifikat gos. registracii avtorskih prav № 5921. 17 July 2002. 5. Solodov, V. G., and Ju. V. Starodubcev. "Opyt trehmernogo modelirovanija szhimaemyh vjazkikh turbulentnyh techenij v turbomashinah." *Ajerogidrodinamika: Problemy i perspektivy*. Kharkov : Nac. Ajerokosm. Un-tet "HAI", 2004. 134–157. Print. 6. Solodov, V. G. "Urvnenija dvizhenija himicheskij ravnesnoj gazovoj smesi s uchetom kondensacii komponenta." *Problemy mashinostroenija*. No 1.1–3, 1999. 41–46. Print.

Поступила (received) 15.02.2015