

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

Построена численная модель и выполнено численное исследование аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД мощной паровой турбины, включающего последнюю ступень с предвключенным межступенчатым зазором, выхлопной патрубком, камеру влагоудаления, переходной патрубком. В качестве рабочего тела использован влажный пар с табличными параметрами. Обсуждается влияние надбандажной протечки в последней ступени, инжекции влажного пара через щель обечайки диффузора

Ключевые слова: последняя ступень ЦНД, система влагоудаления, осерадиальный диффузор, выхлопной патрубок, влажный пар, численное моделирование, аэродинамические, энергетические характеристики.

Введение

Настоящая статья посвящена численному моделированию аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД с учетом свойств влажного пара. Данная модель (рис. 1, 2) является развитием модели потока через отсек «ступень-диффузор», исследованной в [1]. Представлена трехмерная структура, осредненные аэродинамические характеристики элементов отсека, энергетические характеристики каналов ступени и выхлопного патрубка. Обсуждаются методы управления потоком в диффузоре. Исследование проведено с использованием авторского программного комплекса *MTFS*[®]. Некоторые результаты представлены на рис. 3–7.

1 Описание объекта исследования и особенности численной модели

Выхлопной отсек ЦНД, включает последнюю ступень с предвключенным межступенчатым зазором, выхлопной патрубком (ВП) с осерадиальным диффузором (ДФ) и камерой влагоудаления, переходной патрубком (ПП), каналы надбандажных зазоров и отбора пара перед ступенью, щелей влагоудаления из межвенцового зазора ступени, щели инжекции пара в обечайке диффузора. Особенности ступени являются обратная закрутка сопловых лопаток, полочный бандаж, промежуточная демпферная связь и развитая система влагоудаления. Рабочее колесо уплотнено надбандажным профилированным кольцом. Зазор между наружной поверхностью бандажа, имеющего форму многогранника с 95 гранями, и внутренней цилиндрической поверхностью кольца, является переменным. На номинальном режиме зазор составляет 8,5 мм, в зоне стыка отдельных полок – 7,4 мм. Козырек крепится к ободу диафрагмы посредством дистанционных втулок, калибрующих щели влагоудаления. Высота сопла составляет 1034 мм, угол периферийного меридионального раскрытия 40°; длина рабочей лопатки (РЛ) – 1100 мм, веерность – 2,73; степени расширения: осерадиального диффузора – 2,3, патрубка – 2,0; частота вращения ротора 50 с⁻¹. Относительные геометрические

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

размеры выхлопного тракта (по обозначениям [2]): длина и ширина сборной камеры ВП – $\bar{L}_{ВП} = 0,58$, $\bar{B}_{ВП} = 2,13$, высота крышки $\bar{H}_{кр} = 1,74$. Крышка ВП имеет «вырез» для выемки подшипника.

Канал осерадиального диффузора образован поверхностями обтекателя и обечайки. Обечайка состоит из трёх частей: профилированного надбандажного кольца, конической части (с образованием между ними кольцевой камеры для размещения коллектора с форсунками системы охлаждения). Третья часть обечайки в виде фрагмента тора, расположена по отношению ко второй части с зазором для инъекции влажного пара из камеры влагоудаления. Переходной патрубком выполнен с традиционной неаэродинамической формой канала, имеет резко расширяющийся поперечный и осевой размеры.

При моделировании течение через ступень рассчитывалось в стационарной постановке с использованием односекторной модели взаимодействия ступени и патрубка [3]. В модель отсека включены периферийный отбор пара перед диафрагмой ступени, два периферийных кольцевых отсоса пара и влаги из периферийной зоны межвенцового зазора с направлением в камеру влагоудаления, надбандажные протечки пара в предпоследней и последней ступенях, поток инъекции в диффузор из камеры влагоудаления, периферийный бандаж и проволочная демпферная связь. Все особенности геометрии ступени смоделированы в полном объеме, включая утолщение рабочей лопатки вблизи проволочной демпферной связи. Вход в модель ступени организован из двух частей в выходном сечении предвключенной ступени: вход в ядро потока основан на данных теплового расчёта для турбины К-220-44-2, надбандажная протечка предвключенной ступени задается по данным теплового расчета на основании полных параметров и направления вектора скорости.

В камере влагоудаления смоделированы поперечные стенки жесткости с промежуточными окнами для перетекания пара в окружном направлении и перепускные окна вдоль окружной координаты для сообщения с пространством сборной камеры патрубка.

На входе в ступень задаются осесимметричные радиальные распределения параметров торможения – давления и температуры, степени влажности и направления вектора скорости из данных теплового расчета ОАО «Турбоатом». Входные параметры на среднем радиусе составляли: $P^* = 14200$ Па, $T^* = 326,0$ К, $\alpha_0 = 86,5^\circ$, $Y = 6,5$ %. На выходе из переходного патрубка выставилось противодействие в конденсаторе 2942 Па.

Течение в каждой расчетной подобласти описано полной системой нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу-Фавру. Система дополняется уравнениями модели турбулентности. Интегрирование системы уравнений осуществлено с помощью программного комплекса *MTFS*[®], который описан и тестирован в [3–5]. Расчетные подобласти аппроксимируются неструктурированными гексаэдральными сетками. Применяемая версия солвера использует неявную разностную *TVD* схему конечных объемов 2-го порядка точности [6]. Твердые стенки предполагаются адиабатическими, на них задается условие прилипания и равенство нулю эффективной вихревой вязкости. Турбулентные эффекты описаны на основе модели Ментера [7] в ступени и дифференциальной модели турбулентности Спаларта-Аллмараса [7] в патрубках. Мощности сеточного разбиения составили около 15 млн. гексаэдров, что обеспечило параметр погранслоя $Y^+ < 2$ в области ступени и $Y^+ < 4$ в области патрубка.

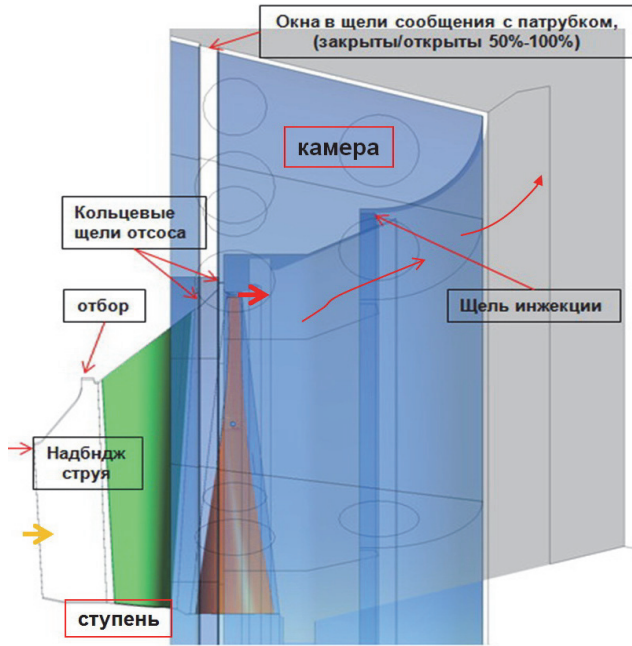


Рис. 1 – Схема проточної частини отсека ЦНД

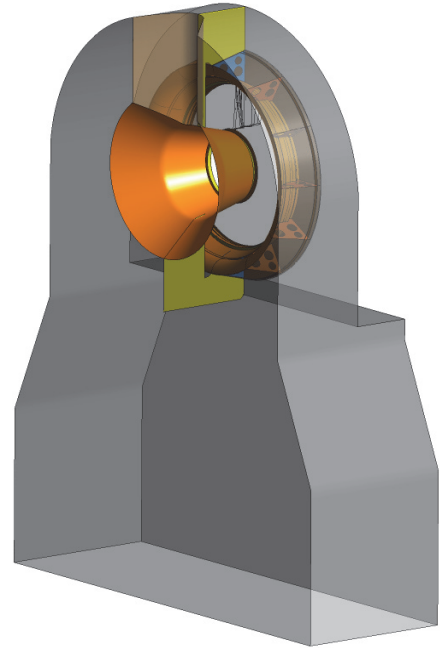


Рис. 2 – Модель ВП і ПП

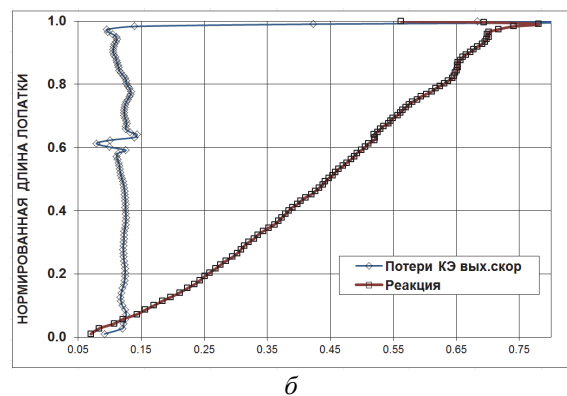
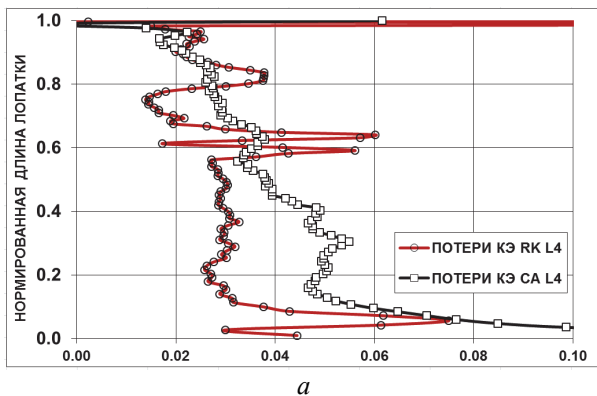


Рис. 3 – Радиальные распределения потерь КЭ на соплах и рабочих решётках, реакции, отнесённые к изэнтропическому перепаду на ступень:
а – соплах и рабочих решётках; б – реакции

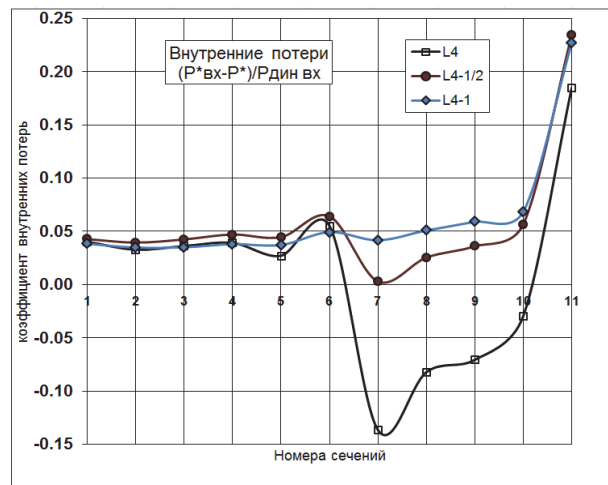
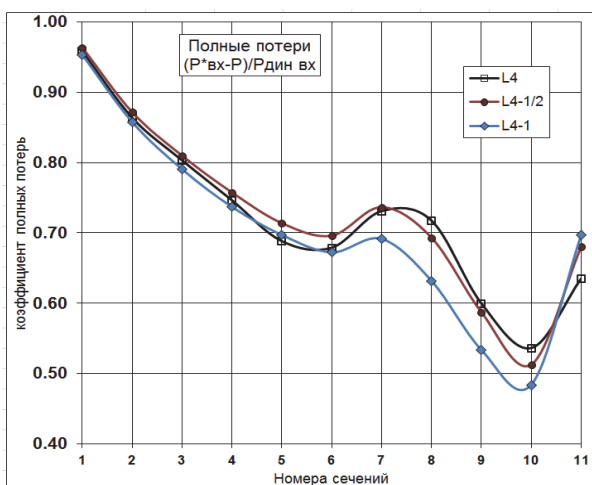


Рис. 4 – Распределения полных и внутренних потерь в ВП по сечениям ДФ; 11 – сечение выхлопа ВП

Расчёты выполнены на основе модели влажного пара, заданного таблицами водяного пара в рамках односкоростного приближения равновесной конденсации. Интегральные данные по выхлопному отсеку сравниваются с данными для отсека «ступень – ДФ» в постановке [1]. Методика обработки расчётных данных для получения интегральных параметров в характерных сечениях расчётной области изложена в [8].

2 Анализ и обсуждение результатов по выхлопному отсеку ЦНД

На входе в ступень кроме параметров ядра потока из предвключенной ступени задана входная надбандажная протечка с параметрами: $P^* = 20471$ Па, $T^* = 333,7$ К, $\alpha_2 = 40^\circ$, $Y = 4,0$ %, которая организована гребнем уплотнения со стороны обоймы и торцом бандажа. В модели ступени включены также периферийный отбор пара перед диафрагмой ступени с расходом 1,67 кг/с, два периферийных кольцевых отсоса пара и влаги из межвенцового зазора с расходами 0,615 кг/с и 2,8 кг/с. Течение в кольцевых щелях отсоса реализуются при сверхзвуковой скорости на входе.

Течение в сопловых каналах реализуется на данном режиме с углами атаки лопаток диафрагмы, набуханием пограничного слоя на вогнутой стороне профилей вдоль удлинителя (рис. 3, 6). В периферийном поясе на входе в канал диафрагмы отмечается область низких скоростей, недостаточная наполненность щели отбора потоком пара. В корневом сечении на входе из-за положительной перекрыши наблюдаются область низких скоростей и набухший погранслои на втулке. Повышенные потери в корневом сечении РЛ вызваны действием скачков уплотнения и малым межвенцовым зазором. Проволочная демпферная связь обтекает с дорожкой вихрей и создает локальные потери кинетической энергии (КЭ) в данном поясе (рис. 3). Этому способствует и аэродинамически несовершенный профиль с утолщением в поясе крепления демпферной связи (см. [1]).

Потери КЭ на сопловом аппарате в составе отсека в сравнении с вариантом «ступень-ДФ» повысились на 0,07 %, на рабочем венце снизились на 0,6 %. Объемный расход GV_2 на выходе из ступени для отсека составил 2327 м³/с против 2203 м³/с для варианта «ступень-ДФ» (по данным теплового расчёта – 2383 м³/с). Потери с выходной скоростью за ступенью для отсека составили для отсека 13,7 % против 13,2 % для варианта «ступень-ДФ». Сравнение потерь КЭ указывает, что ступень с фрагментом диффузора работает менее эффективно из-за худшего восстановления давления на выходе, несмотря на меньший отсос пара. Среднее значение влажности на входе в РК – 9,4 % – повышено на 0,1 % в сравнении с вариантом «ступень-ДФ», за кромками РК составляет 12,1 % в сравнении с 11,82 % для варианта «ступень-ДФ».

Кольцевая струя влажного пара, выходящая из канала между вращающейся поверхностью полочного бандажа и цилиндрической поверхностью козырька, ускоряется, достигает скорости 754 м/с (2,153 М), раскручивается вдоль обечайки диффузора, постепенно замедляется, и замыкается за расширительной камерой. Экстремальные значения в струе надбандажной протечки на выходе из зазора: плотность 0,012 кг/м³, давление 1400 Па, осевая скорость – 620 м/с, радиальная скорость – 215 м/с, окружная скорость – 370 м/с, угол $\alpha_2 = 135^\circ$, влажность – 14 %. Температура на стенке 350 К, перепад температур в пограничном слое составляет около 60 К. Расход пара через протечку составляет 1,416 кг/с или 2,67 % расхода через выходное сечение ступени. Ядро потока, на входе в диффузор, имеет переменную по радиусу, положительную закрутку со средним значением около $\alpha_2 = 106^\circ$ по часовой стрелке по ходу пара. В корневом поясе угол α_2 составляет 95 град. Максимальные значения угла α_2 около 115° достигаются в поясе проволочной демпферной связи.

Несмотря на осесимметричный интерфейс с торцом входного сечения ДФ патрубка распределение параметров во входном сечении диффузора не осесимметричное вследствие закрутки потока по часовой стрелке по ходу пара. Максимум модуля скорости смещен от плоскости симметрии против часовой стрелки на угол $\sim 35^\circ$ (рис. 5).

На структуру течения в диффузоре оказывают определяющее влияние три фактора: надбандажная протечка из зазора РЛ, струя инжекции пара из камеры, и закрутка основного потока. Надбандажная струя обладает импульсом и моментом импульса, достаточными для прижатия потока к обечайке вплоть до щели инжекции. Струя инжекции также имеет сверхзвуковое истечение с расходом 3,41 кг/с, но практически не закручена. Совокупное действие двух струй и закрутки основного потока обеспечивает отсутствие отрыва потока на всей длине обечайки и по всей окружности диффузора. Это действие настолько сильное, что за вторым изломом втулки, переводящим ее в вертикальную стенку, возникает периодический отрыв потока от втулки. В нижней части плоскости симметрии этот отрыв распространяется практически на всю втулку. Из-за подсасывающего действия струи вдоль обечайки возникает состояние незаполненности проточной части диффузора в привтулочных сечениях, и значительные поперечные градиенты параметров (рис. 5, 6).

В целом, структура входного потока в ДФ обладает значительной поперечной неравномерностью. След от демпферной связи распространяется на всю длину диффузора. Между следом и струей вдоль обечайки на выходе из диффузора образуется обширный провал поля скорости. Низкоскоростная область под струей по мере расширения диффузора значительно тормозится и расширяется. Эффект закрутки в ядре потока приводит к интенсификации стока пара в переходный патрубок в правой по ходу пара части диффузора и патрубка. В левой части патрубка сток пара тормозится закруткой (в противоположном направлении), и в этой части возникает область пониженных скоростей.

Закрутка потока в ядре взаимодействует с разделительными стенками вдоль плоскости симметрии. В левой части патрубка поток отрывается от стенки внизу на выхлопе; в правой части патрубка, наоборот, отрыв от стенки сверху патрубка образует обширную закрученную отрывную область, которая перемещается к выхлопу и загромождает проточную часть.

Поток на выходе из ВП и в переходном патрубке носит отрывной характер, не заполняет площадь выхлопа, несмотря на надстройку переходного патрубка длинным коробом постоянного поперечного сечения. Незаполненность выходного сечения расчетной области составляет до 20 % площади и вызывает колебания расхода, которые в значительной степени гасятся в плоскости входа в переходный патрубок и практически не распространяются в диффузор. В этой связи в дальнейших исследованиях в модель целесообразно вводить в пространствах патрубков системы стержней и труб, размещенные в реальных ВП и ПП.

Камера влагоудаления над обечайкой ДФ содержит 12 поперечных перегородок жесткости, снабженных тремя отверстиями каждая, для вентиляции пара и равномерного заполнения всей камеры. По результатам расчетов вентиляцию обеспечивают ближние к передней стенке верхнее (малое) и нижнее (большое) отверстия. Дальнее отверстие большого диаметра слабо влияет на процесс вентиляции в камере по причине размещения пары ближних отверстий против щелей отсоса. Кроме того, в камере вблизи передней стенки вблизи вентиляционных отверстий расположены 24 окна в форме кольцевой структуры сброса пара в сборную камеру патрубка для регулирования импульса струи инжекции. В рассматриваемом исходном варианте окна выпуска пара в патрубок закрыты.

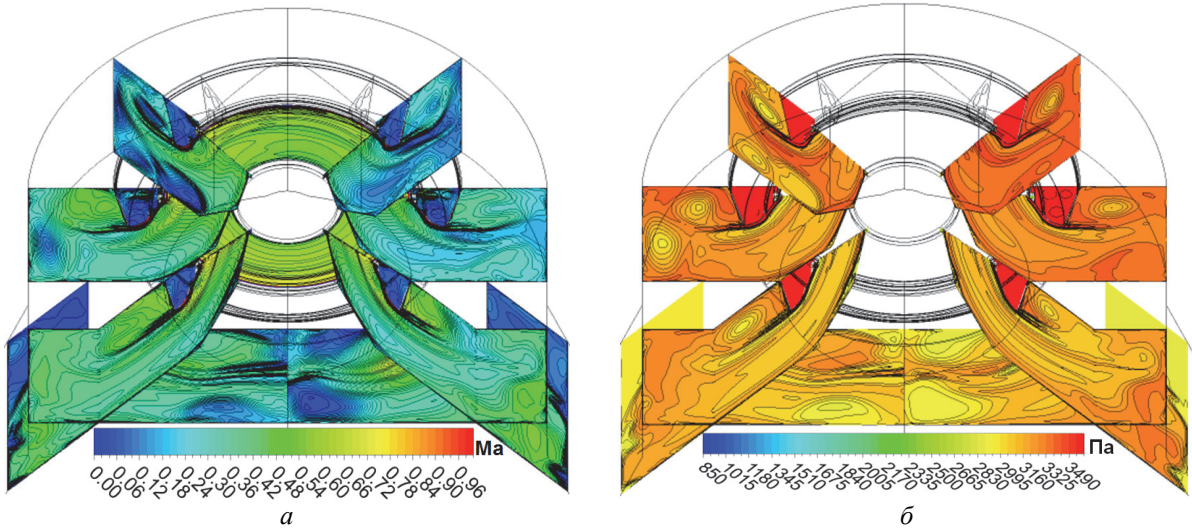


Рис. 5 – Поля числа Маха (а) и полного давления (б) в сечениях ВП для варианта L4

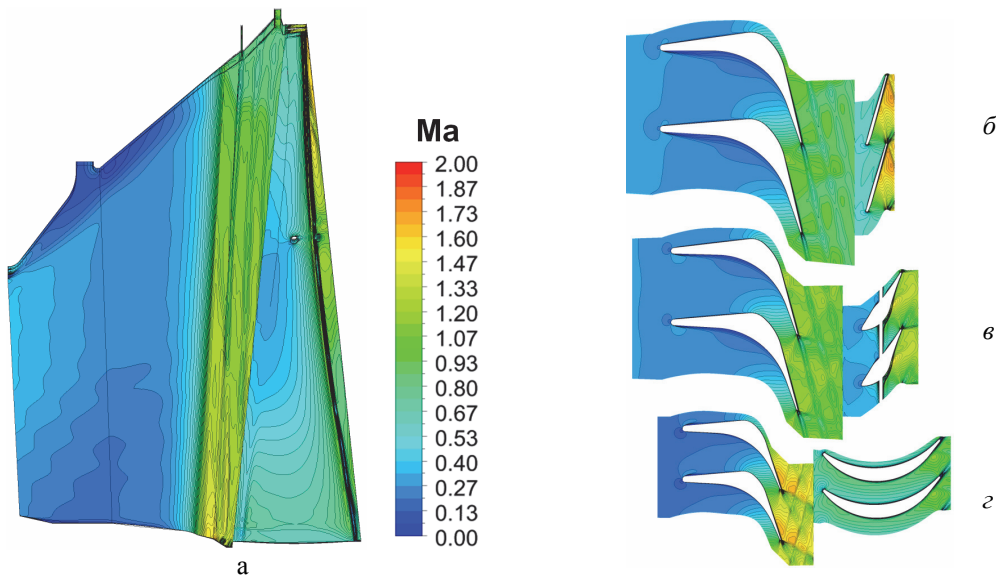


Рис. 6 – Поля относительного числа Маха ступени для варианта L4:
а – в меридиональном сечении; б, в, г – в радиальных сечениях

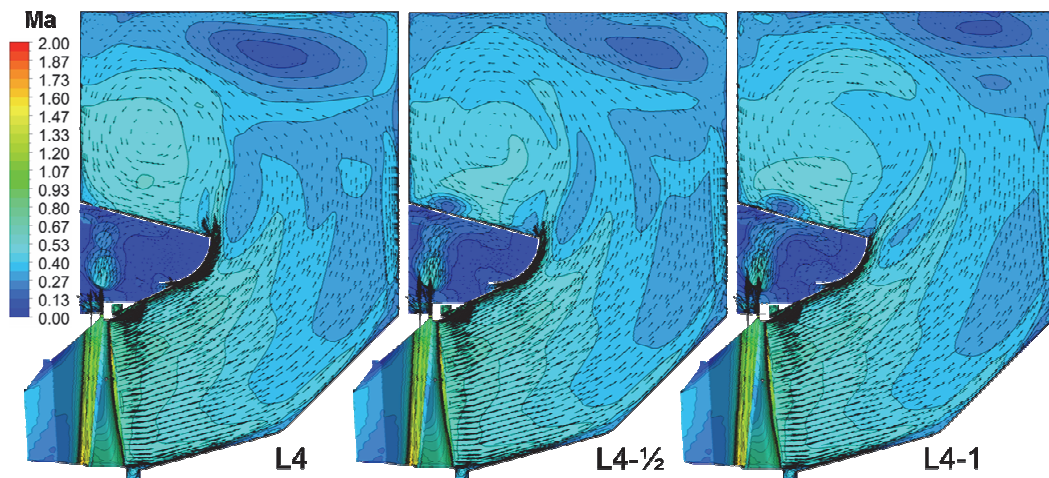


Рис. 7 – Течение в правой по ходу пара стороне горизонтального разъёма в вариантах ВП

Полные и внутренние потери в диффузоре и патрубке (рис. 4, вариант $L4$) имеют неоднозначное трактование в условиях промежуточной инъекции высокоэнергетической струи пара. Осредненные по расходу полное и статическое давления по равномерному набору конических сечений в патрубке, нормальных среднему вектору скорости, сравнивались с осредненным по расходу полным давлением во входном сечении диффузора (с учетом энергии надбандажной струи). Разница давлений относилась к величине динамического давления во входном сечении. Такой подход для полных потерь давления приводил к локальному падению потерь после сечения инъекции (рис. 4) в диффузоре и последующему росту потерь в сечении выхода ВП (сеч. 11). Значение коэффициента потерь составило $\zeta_{ВП} \approx 0,65$. Если считать энергию инжектируемой струи потерянной при управлении потоком в диффузоре, то коэффициент $\zeta_{ВП}$ выше примерно на 30 %. Данный результат получается при учете в полном давлении основного потока полного давления инжектируемой струи, взвешенного по расходу. Вместе с тем, отсос влаги перед РЛ является вынужденной мерой, и влажный пар вынужденно сбрасывается в диффузор и конденсатор. По этой причине и при данной организации выхлопа значение $\zeta_{ВП} \approx 0,65$ можно считать обоснованным. При дальнейшем использовании энергии сброшенного пара устройство патрубка требует модификации.

График внутренних потерь ВП также имеет падение в сечениях после щели инъекции. В результате инъекции внутренние потери, рассчитанные по разности полного давления на входе в диффузор и полного давления в сечении, становятся локально отрицательными (т.е. энергия поступает дополнительно за счет инъекции), а затем возрастают к сечению выхода из патрубка до значения 0,19.

О регулировании расхода инъекции. Отсек ($L4$), представленный в предыдущем разделе, имеет особенности работы при *полностью* ($L4-1$) и *наполовину* ($L4-1/2$) открытых окнах сброса влажного пара из камеры в патрубок. Поля числа Маха в правом по ходу пара сечении горизонтального разъёма (рис. 7) близки. Степень в составе отсека $L4-1$ работает на режиме $GV_2 = 2270 \text{ м}^3/\text{с}$, для $L4 - 2327 \text{ м}^3/\text{с}$. GV_2 отсека с полузакрытыми окнами ($L4-1/2$) занимает промежуточное значение.

Потери КЭ, отнесённые к располагаемому перепаду на ступень, в соплах составляют 4,38 %, на рабочих каналах – 3,44 %, потери с выходной скоростью составляют 13,7 % и практически не зависят от степени открытия окон, структура течения и расходные характеристики ступени изменяются незначительно.

Надбандажная струя обеспечивает эффективное безотрывное течение вдоль обечайки до точки инъекции пара из камеры. Заметных отличий по надбандажной струе в вариантах $L4-L4-1$ нет. В вариантах отсека с полуоткрытыми и открытыми окнами импульс и энергия инжектируемой струи обеспечивают ее прилипание, но на выходе из диффузора струя имеет дозвуковой режим и тенденцию к отрыву (рис. 7).

Сброс около 1,7 кг/с расхода пара через открытые окна в патрубок вблизи передней стенки (3,2 % от входного расхода в ступень) заметно повышает полное и статическое давление в патрубке. Сверхзвуковые струи попадают в пространство патрубка вблизи передней стенки, тормозят закрутку в сборной камере, повышают потери энергии в патрубке.

Таблица 1.

Расходы пара на элементах выхлопного тракта

Расходы на ступень, кг/с	Ст-ДФ	Ст-ДФ без отсоса	Отсек L4 без окон	Отсек L4-½ ½ окон откр.	Отсек L4-1 все окна откр.
Вход в ступень	53,99	53,97	53,99	52,80	52,80
Надб. вх. струя	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Отбор	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
Отсос 1	0,473	0	0,679	0,679	0,679
Отсос 2	1,94	0	2,92	2,92	2,92
Надбанд. струя	1,473	1,544	1,416	1,416	1,416
Выход ступени	50,36	52,75	49,36	49,18	49,2
Инжекция	–	–	3,41	2,41	1,74
Выход ДФ	–	–	52,64	51,53	50,74
Выход ВП	–	–	52,8	53,3	52,5
Выход ПП	–	–	54,2	52,7	52,5

На рис. 4 представлены результаты вычисления потерь энергии по сечениям и на выходе из ВП. Анализ структуры течения вдоль обечайки диффузора показывает, что при снижении расхода инъекции в два раза отрыв потока от обечайки практически не возникает, поток заполняет выходное сечение диффузора. При этом скорость пара в струе после инъекции не достигает скорости звука в отличие от режима с закрытыми окнами. Однако коэффициент полных потерь выхлопного тракта растёт (табл. 2), что можно объяснить воздействием потоков пара из отверстий сброса пара из камеры инъекции на поток в сборной камере патрубка за диффузором и стеснением пространственного вихревого течения (рис. 6). Структура таких течений исследована в ряде работ [9], где сделан вывод о неэффективности средств предотвращения закрутки потока в сборной камере.

Таблица 2.

Потери энергии в вариантах патрубка без загромождений отсека K220-44/4

Потери энергии ВП	Отсек L4 без окон	Отсек L4-½ ½ откр. окон	Отсек L4-1 окна открыты
Полные потери $(P_{вх} - P_{вых})/P_{дин вх}$	0,64	0,68	0,70
Внутренние потери $(P_{вх}^* - P_{вых}^*)/P_{дин вх}$	0,185	0,235	0,23

По результатам анализа можно заключить, что устройство выхлопного тракта при переброске пара из межвенцового зазора в камеру для последующей инъекции в диффузор себя оправдывает в смысле снижения потерь в ВП. Если не могут быть найдены решения для использования энергии сбрасываемого пара для выработки энергии (3,2 % от расхода через ступень), то данное решение следует признать эффективным.

Выводы

Разработана математическая модель и проведены расчётные исследования на влажном паре выхлопного отсека ЦНД с учётом параметров потока в межступенчатом канале с надбандажной протечкой и отбором пара перед последней ступенью, последней ступени ЦНД с РЛ 1100 мм с двумя кольцевыми отсосами пара и влаги из

периферийной зоны в камеру влагоудаления, надбандажной протечки пара в последней ступени, потока инжекции в диффузор из камеры влагоудаления, периферийного бандажа и проволочной демпферной связи межвенцового зазора и выхлопного тракта, включающего выхлопной и переходной патрубки, влияния величины импульса струи инжекции пара в диффузор.

Установлено, что при наличии инжекции и надбандажной струи обечайка диффузора на номинальном режиме является безотрывной. При наличии инжекции и надбандажной струи расчет по стандартным формулам приводит к значениям полных потерь в патрубке 0,65–0,70, внутренним потерям – 0,19–0,23.

По результатам расчётов можно заключить, что устройство ВП при переброске пара из межвенцового зазора в камеру влагоудаления для последующей инжекции в диффузор оправдано в смысле снижения потерь в ВП. Рациональным вариантом является формирование сбалансированной системы влагоудаления и инжекции.

Список литературы: 1. Швецов, В. Л. Исследование аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД «ступень-диффузор» [Текст] / В. Л. Швецов, И. И. Кожевникова, В. А. Конев, В. Г. Солодов, А. А. Хандримайлов // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПИ», 2014. – № 12(1055). – С. 12–20. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. 2. Мигай, В. К. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин [Текст] / В. К. Мигай, Э. И. Гудков. – Ленинград : Машиностроение, 1981. – 272 с. 3. 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. 4. Солодов, В. Г. Влияние гомогенной/гетерогенной конденсации на нестационарное течение в осерациальном диффузоре [Текст] / В. Г. Солодов, Ю. В. Скорый, Ю. И. Руднев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2000. – № 111. – С. 110–116. 5. 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. 6. Liou, M. S. A Sequel to AUSM: AUSM+ [Text] / M.S. Liou // Journ. of Computational Physics. – 1996. – Vol. 129. – P. 364–382. 7. Солодов, В. Г. Моделирование турбулентных течений [Текст] / В. Г. Солодов. – Харьков: изд-во ХНАДУ, 2011. – 167 с. 8. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин / Под ред. В.А. Черникова. – Ленинград : Машиностроение, 1980. – 262 с. 9. Касилов, В. Ф. Исследование средств активного воздействия на закрученное течение в сборной камере выходных патрубков цилиндров низкого давления паровых турбин [Текст] / В. Ф. Касилов // Теплоэнергетика. – 2000. – № 11. – С. 28–33.

Bibliography (transliterated): 1. Shvecov, V. L., et al. "Issledovanie aerodinamicheskikh i jenergeticheskikh karakteristik vykhlopного отсека CND "stupen'-diffuzor"." *Visnyk NTU "KhPI". Serija: Energetychni ta teplotekhnichni procesy j ustatkuvannja.* No 12(1055). Kharkov : NTU "KhPI", 2014. 12–20. ISSN 2078-774X. Print. 2. Migaj, V. K., and Je. I. Gudkov. *Proektirovanie i raschet vyhodnyh diffuzorov turbomashin.* Leningrad : Mashinostroenie, 1981. Print. 3. Solodov, V. G., and Ju. V. Starodubcev. "Opyt trehmernogo modelirovanija szhimaemyh vjazkih turbulentnyh techenij v turbomashinah." *Ajerogidrodinamika: Problemy i perspektivy.* Kharkov : Nac. Ajerokosm. Un-tet «HAI», 2004. 134–157. Print. 4. Solodov, V. G., Ju. V. Skoryj and Ju. I. Rudnev. "Vlijanie gomogennoj/geterogennoj kondensacii na nestacionarnoe techenie v oseracial'nom diffuzore." *Vestnik NTU «KhPI».* No. 111. 2000. 110–116. Print. 5. Solodov, V. G., and Ju. V. Starodubcev. "Nauchno-prikladnoj programmnyj kompleks *MTFS*[®] dlja rascheta trehmernyh vjazkih turbulentnyh techenij zhidkoste j i gazov v oblastjah proizvol'noj formy." *Ukrainy. Ukrainское Gosudarstvennoe Agentstvo po avtorskim i smezhnym pravam.* Sertifikat gos. registracii avtorskih prav № 5921. 17 July 2002. 6. Liou, M. S. "A Sequel to AUSM: AUSM+." *Journ. of Computational Physics.* Vol. 129. 1996. 364–382. Print. 7. Solodov, V. G. *Modelirovanie turbulentnyh techenij.* Kharkov : izd-vo HNADU, 2011. Print. 8. *Ajerodinamicheskie karakteristiki stupenej teplovyh turbin.* Ed. V. A. Chernikova. Leningrad : Mashinostroenie, 1980. Print. 9. Kasilov, V. F. "Issledovanie sredstv aktivnogo vozdeystvija na zakruchennoe techenie v sbornoj kamere vyhodnyh patrubkov cilindrov nizkogo davlenija parovyh turbin." *Teplojenergetika.* No 11. 2000. 28–33. Print.

Поступила (received) 02.02.2015