

В. Г. СОЛОДОВ, А. А. ХАНДРИМАЙЛОВ, В. Л. ШВЕЦОВ, И. И. КОЖЕШКУРТ, В. А. КОНЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТСЕКА СТУПЕНЕЙ С ПАТРУБКОМ ПАРОВПУСКА ЦНД МОЩНОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ С УЧЁТОМ ПРОТЕЧЕК

АННОТАЦИЯ Рассмотрены результаты расчётно-конструкторских разработок и численных исследований входного патрубка с первой ступенью и отсека первых трёх ступеней с учётом отбора пара, протечек через диафрагменные, надбандажные уплотнения и разгрузочные отверстия в дисках ЦНД турбины К-1250-6,9/25. Представлены некоторые методические аспекты и результаты совершенствования исследованных объектов с помощью численного эксперимента.

Ключевые слова: входной патрубок, отсек ступеней, численная модель, ЦНД, паровая турбина.

V. SOLODOV, A. KHANDRIMAILOV, V. SHVETSOV, I. KOZHESHKURT, V. KONEV

INVESTIGATION OF AERODYNAMIC AND ENERGY CHARACTERISTICS OF L.P.C. COMPARTMENT OF STAGES WITH INLET PIPE AND LEAK SYSTEM FOR POWERFUL STEAM TURBINE UNIT

ABSTRACT The results of computational and engineering developments and numerical studies of the inlet pipe compartment with the first three stages are represented, taking into account the steam extraction, leak ages under the diaphragms, shroud seals and discharge openings in the disks of low pressure cylinder of the turbine K-1250-6,9/25. All the computations were based on the model of one speed wet steam flow without droplets and supercooling was not taken into account. The sectorial approach was applied to description of the interaction of the inlet pipe and the group stages. The stages were considered in steady state formulation. The initial data and boundary conditions were taken basing on thermal design of ²TURBOATOM². Some methodological aspects and the results of improving of studied facilities by numerical experiment by **MTFS**® code are discussed. It is shown that the main total pressure loss in inlet pipe arises in inlet pipe collector and in place of its connection with tube. The improvement of inlet pipe annular collector due to the profiled sheets and input tube knee reduces the internal loss coefficient in 2 times. The axial length of the radial-axial outlet channel increase and the height of the splitter reduction almost no effect on the internal losses, but significantly (by 45%) reduce the coefficient of circumferential non-uniformity of static pressure at the stage inlet. Based on the item-evaluation of the effectiveness the final version of the inlet (M7) is developed. It is revealed that the inlet flow angles on the nozzle edges in the left and right sides of the inlet pipe are substantially symmetrical, i.e. the back effect of stages on the inlet pipe is small. The KE loss on the nozzles of 1st stage in the different sectors is different; on sectors of 1st blade row the loss and load are uniform. This effect persists for the next stages. Studies of the first three stages of the compartment based on leaks through the seal and discharge openings, sucking and suction, steam extraction showed that the root suctions behind the nozzles comply with the recommendations of MEI. Design of new seal for blade rows of 1st and 2nd stages in real boundary conditions showed a relatively high efficiency and the weak dependence on flow rate for axial position of the rotor relatively to the stator.

Key words: LPC Inlet pipe, stages compartment, numerical model.

Введение

В статье рассматривается комплексное решение задачи повышения технико-экономических показателей цилиндра низкого давления (ЦНД), которое состоит в снижении диссипации энергии и неравномерности давления в отсеках паровпуска и первых трёх ступеней путём выполнения вариантных разработок и их оценок в результате проведения численных экспериментов.

1 Цель и задачи работы

Цель работы – разработка и исследования мероприятий по совершенствованию газодинамических и энергетических характеристик элементов ЦНД.

Задачи работы – разработка математических и 3D вычислительных моделей отсеков паровпуска, включающих варианты входного па-

трубка и первых трёх ступеней с вариантами диафрагменных и надбандажных уплотнений, промежуточным отбором пара, разгрузочными отверстиями в дисках рабочих колёс и входным радиально-осевым каналом входного патрубка; численные исследования вариантов отсека на номинальном режиме с оценкой влияния отдельных геометрических параметров проточной части на характеристики входного патрубка и ступеней. Основные результаты работы докладывались в [1].

2 Математическая модель течения и постановка численного эксперимента

В численном эксперименте использован программный комплекс **MTFS@software** [2, 3], обеспечивающий интегрирование уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу-Фавру на основе неявной разностной TVD схемы конечных объёмов 2-го порядка точности и варианта алго-

ритма [3], допускающего эффективное расщепление вычислительного процесса для многопроцессорных платформ. Расчётные подобласти аппроксимировались неструктурированными гексагональными сетками. Твёрдые стенки предполагались адиабатическими с условием прилипания и равенством нулю эффективной вихревой вязкости. Турбулентные эффекты описывались на основе SST модели Менгера [4]. Все расчёты выполнены на основе табличной модели влажного пара и приближения равновесной конденсации.

Входной патрубок (рис. 1, 2) симметричен относительно продольной и поперечной вертикальных плоскостей. Его коллектор имеет значительное количество внутренних структурных элементов и два подвода в нижней половине. С целью экономии вычислительных ресурсов использован секторный подход [3] на интерфейсах пространства патрубка и каналов диафрагмы 1-й ступени. На окружности подвода использовались 6 секторов интерфейса (рис. 3). Каждому сектору соответствовала одна проточная часть ряда ступеней. В процессе расчёта течения в патрубке и отсеке угловой размер секторов варьировался для минимизации окружного градиента полного давления на интерфейсе.

Мощности сеточного разбиения по элементам отсека в среднем составляли около 5–7 млн. ячеек в проточной части входного патрубка и до 30 млн. ячеек в ступенях отсека. Все каналы уплотнений в ступенях и междисковые разгрузочные отверстия моделировались в полной трёхмерной постановке в рамках условий периодичности. Расчётная область за 3-й ступенью (рис. 4) достраивалась коаксиальной цилиндрической трубой.

Численное моделирование течения в вариантах отсека проводилось в условиях отсутствия

возможности экспериментальной проверки получаемых результатов. Поэтому стратегия численного эксперимента основывалась на опыте расчётных исследований паровпускных одноступенчатых отсеков [5], предварительном выборе вычислительной сетки для течения через изолированное одиночное уплотнение. Результаты расчётов сравнивались с известными экспериментальными данными [6, 7]. Подобранные таким образом параметры сеточного разрешения применялись при составлении модели трёхступенчатого отсека с протечками.

В математической модели описаны все основные геометрические параметры, определяющие характеристики проточной части первых трёх ступеней ЦНД, в том числе надбандажные и диафрагменные уплотнения, разгрузочные отверстия, отбор пара. Моделирование выполнено для номинального режима работы ЦНД на основе данных теплового расчёта ПАО «Турбоатом». При этом на входных сечениях подводящих труб задавались полные параметры потока без завихренности и нулевая влажность. На удалении от выхода 3-ей ступени фиксировалось постоянное вдоль радиуса статическое давление. На выходе из диафрагменной протечки ставилось статическое давление в корневом сечении межвенцового зазора 4-й ступени из теплового расчёта.

3 Некоторые результаты исследования отсека и обсуждение

Варианты входного отсека ЦНД тихоходной паровой турбины К-1250-6,9/25 проекта ПАО «Турбоатом» представлены на схеме проточной части (рис. 1). Основные данные исходной конструкции приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1 – Геометрические характеристики входного патрубка

Параметр	Обозначение	Размерность	Величина
Диаметр кольцевой камеры входного патрубка	$D_{к.к.}$	мм	6880
Ширина кольцевой камеры входного патрубка на $D_{к.к.}$	$b_{к.к.}$	мм	1592
Диаметр ресиверов входного патрубка	D_p	мм	1592
Положение оси ресиверов ниже плоскости разъема ЦНД	h	мм	544,5
Количество ресиверов входного патрубка	z	шт	2
Полуширина радиального канала патрубка на входе	a_p	мм	510
Ширина кольцевого канала перед разделением его на два кольцевых канала с поворотом на 90 град.	$2a$	мм	400
Высота сопловой решетки на входе	L_c	мм	225
Отношение полуширины горла радиального канала на выходе к высоте сопловой решетки	a/L_c	—	0,89

Таблица 2 – Геометрические характеристики ступеней

Параметр	Обозначение	Размерность	№ ступени		
			1	2	3
Высота сопла	L_c	мм	225	335	521
Корневой диаметр сопловой решётки	$D_{с.к}$	мм	3052	3040	3020
Углы выхода потока из сопла	α_{1cp}	град	14,3	14,6	13,8
Количество сопловых лопаток	z_c	шт	142	142	142
Количество рабочих лопаток	$z_{л}$	шт	220	170	100
Длина рабочих лопаток	$L_{л}$	мм	238	394	590
Корневой диаметр рабочей решётки	$D_{л.к}$	мм	3046	3030	3005
Веерность рабочих лопаток	$D_{л}/L_{л}$	--	13,8	8,69	6,09
Угол корневого меридионального раскрытия	$\vartheta_{л.к}$	град	0	0	0
Угол периферийного раскрытия	$\vartheta_{л.п}$	град	0	15	0
Периферийная перекрыша (радиальная)	$\Pi_{п}$	мм	10	32,5	61,5
Углы выхода потока из ступени	β_{2cp}	град	20,4	19,0	18,2
Уплотнение надбандажное	—	—	лабиринтное прямоточное		
Радиальный зазор	dr	мм	3	3,5	4
Количество гребней на статоре	Z	шт	7	8	2+3
Уплотнение диафрагменное	—	—	ступенчатое		

3.1 Методика обработки полей газодинамических величин

Интегральные массовые и энергетические характеристики элементов отсека вычислялись в характерных сечениях: на входе в патрубок, по входным и выходным кромкам сопловых и рабочих лопаток рассматриваемых ступеней. Осреднение параметров в этих сечениях выполнялось по методике [8]. Интегральные значения потерь полного давления и кинетической энергии (КЭ) на участках между сечениями определялись по общепринятым формулам [6, 8].

3.2 Совершенствование аэродинамических характеристик входного патрубка

Совершенствование входного отсека выполнялось перебором вариантов методом эвристического поиска. Таким путём была выбрана высота и конфигурация рассекателя, размер горла, ширина и осевая длина осерадиального канала, внутренние очертания коллектора и форма канала сопряжения подводящей трубы (ресивера) с коллектором.

В предварительных расчётах вариантов патрубка выполнялось осреднение параметров потока в зазоре вдоль окружности интерфейса между патрубком и входом в ступень. Исходя из данных предварительных расчётов, а также с учётом малости окружных градиентов параметров на интерфейсе «ступень–патрубок», выбраны секторы

осреднения размером в 30°, 60°, 90°. Кроме того учитывалось, что патрубок спроектирован с установкой разделительных стенок в плоскости симметрии. На каждом секторе рассчитывалось течение в группе ступеней с осреднением по расходу в межвенцовом зазоре, т.е. в стационарной постановке. По результатам расчётов течения получены потери давления в трубке и потери КЭ в ступенях в каждом секторе. Отсчёт углов на графике потерь принят от верхнего разделителя. Потери КЭ в секторах ступени вычислялись по отношению к перепаду на каждый сектор ступени, затем взвешивались по расходу через секторы подвода.

Ряд некоторых значимых вариантов коллектора с каналом сопряжения с трубой ресивера представлен на рис. 2 с нанесёнными изолиниями полного давления в плоскости симметрии патрубка. Из рисунка можно сделать вывод о двух последних конфигурациях М6, М7 как наиболее экономичных. При этом вариант М6 является идеализированным, вариант М7 сохраняет положительные качества М6 и предложен к реализации в проекте.

Основные потери полного давления во входном патрубке, отнесённые к скоростному напору на выходе из патрубка, возникают в пассивных зонах коллектора и в местах сопряжения подводящей трубы и коллектора. Дополнительные потери вносит наличие стержневой силовой системы. Коэффициенты полных и внутренних потерь при калибровке последних скоростным напором на выходе составляют 1,28–1,56 и 0,25–0,51

соответственно. Устройство эффективного диффузорного сочленения ресивера с кольцевой камерой патрубка и профилированных выгородок в верхней и нижней половинах коллектора обеспечивает существенное уменьшение потерь: коэффициент внутренних потерь патрубка в варианте М6 относительно варианта М5 уменьшается с 0,517 до 0,253, т.е. в два раза, однако это усложняет конструкцию патрубка. Упрощение конструкции в верхней части (М7) незначительно повышает потери в патрубке.

При исследованной организации входного отсека вклад завихренности на периферии проточной части от параметров канала с разделением и поворотом потока к первой ступени в потери КЭ для рассмотренных вариантов отличается мало.

Оценка неравномерности полного давления на входе в первые ступени показывает, что варианты улучшенного подвода с удалением плоскости входа в ступень от оси ЦНД дают сниженный на 30 % коэффициент неравномерности в сравнении с исходным входным отсеком. Улучшенное сопряжение ресиверов с кольцевой камерой в исходном варианте дает снижение коэффициента неравномерности на 10%. Можно рассчитывать на дальнейшее снижение коэффициента неравномерности при объединении этих направлений модернизации.

На рис. 3 представлены потери кинетической энергии (КЭ) в каналах 1-й ступени на разных секторах подвода для усовершенствованных коллекторов входного патрубка М7. Несмотря на различия в знаках угла атаки кромок сопловых лопаток для правого и левого подводов потери по секторам и подводам различаются относительно мало. Для диафрагм 2-й и 3-й ступеней это различие выражено слабо.

Следует заметить, что при многосекторной детализации отвода через ступень потери давления в патрубке практически не изменяются; таким образом, использованная в предыдущих работах односекторная модель отсека [5] даёт достоверные результаты для газодинамических характеристик патрубка.

3.3 Совершенствование аэродинамических характеристик отсека ступеней

Течение в исходном отсеке ступеней по средним параметрам в среднем соответствует данным теплового расчёта по зазорам. Температура пара к выходу третьей ступени снижается на 70 град, влажность, отсутствующая на входе в патрубок, появляется за сопловым аппаратом (СА) № 1, на выходе ступени № 3 достигает 7 % в ядре потока, при этом периферийный и корневой пояса содержат не более 3 % влаги из-за протечек через уплотнения. Ступени работают в дозвуковом ре-

жиме, максимальное число Маха 0,95 достигается локально в корневой зоне межвенцового зазора 3-ей ступени (рис. 4). Рабочие лопатки 1-ой и 2-ой ступеней исходного отсека на номинальном режиме обтекаются с углом атаки в спинку по всей высоте, в модернизированном отсеке обтекаются безударно (рис. 5, 6).

Увеличение осевой длины радиально-осевого канала и уменьшение высоты рассекателя практически не влияет на величину внутренних потерь, но существенно (на 45 %) снижает коэффициент окружной неравномерности статического давления перед ступенью. С учётом дополнительного улучшения формы каналов коллектора и колена ресивера коэффициент неравномерности уменьшается на 58,7 % (М7).

Анализ рис. 7 показывает, что потери КЭ практически на всех каналах для исходных ступеней выше, чем для модернизированных ступеней. В частности, рабочие каналы модернизированного отсека показывают более высокую эффективность за счёт изменённых профилей и существенно меньших расходов надбандажной протечки в результате замены прямооточного уплотнения на разношаговое многодрессельное уплотнение (РМУ) (рис. 8). В 3-й ступени сохранено исходное исполнение рабочего венца.

Исследования 1-й, 2-й, 3-й ступеней в составе отсека показывают эффективность предложенных мероприятий по модернизации сопловых и рабочих решёток. Усовершенствование сопряжения сопловых и рабочих решёток в ступенях отсека и их корректировка с учётом изменения располагаемых теплоперепадов позволили снизить коэффициент потерь КЭ 1-й ступени на 7,5 %, 2-й – на 18,7 %, 3-й ступени – на 22,7 %.

Исследования РМУ рабочих колёс 1-й и 2-й ступеней показали их сравнительно высокую эффективность и малую зависимость расхода от осевого положения ротора относительно статора (в пределах 12 %). В частности, расход через надбандажные уплотнения данных ступеней снижен в ~6 раз (рис. 8), а также улучшено течение в периферийном поясе СА2, СА3.

Анализ моментных характеристик рабочих венцов показал повышение КПД всех ступеней для модернизированного отсека в сравнении с исходным отсеком также за счёт перенаправления части пара надбандажной протечки в рабочие каналы ступени. Анализ влияния ширины входного сечения радиально-осевого канала патрубка показал, что уменьшать её относительно исходного значения не целесообразно.

Условность определения граничных параметров за третьей ступенью отсека указывает на необходимость проведения численных исследований всей проточной части ЦНД.

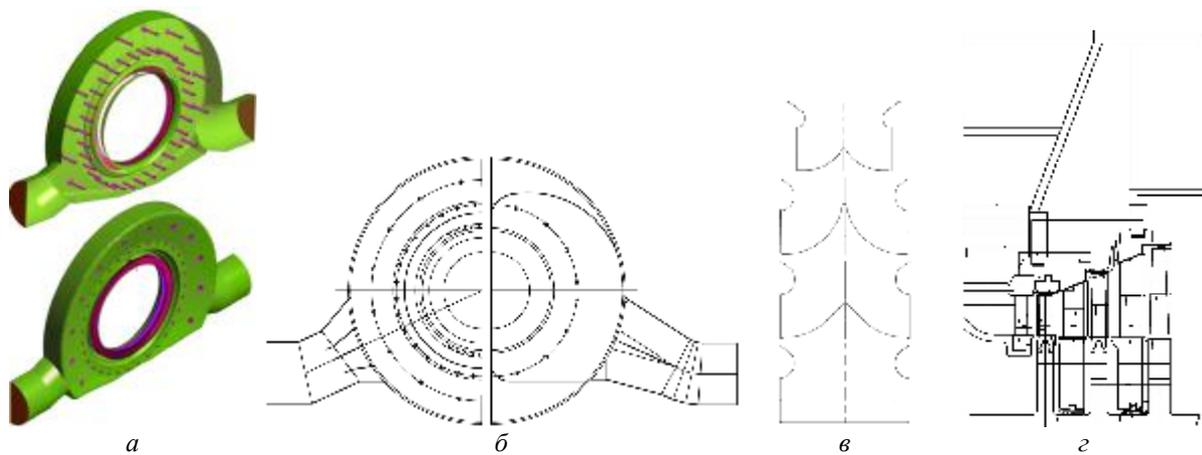


Рис. 1 – Схемы элементов отсека и расчётной области:
а, б – варианты М0, М5, М6; в – варианты входного канала; z – модернизированная проточная часть

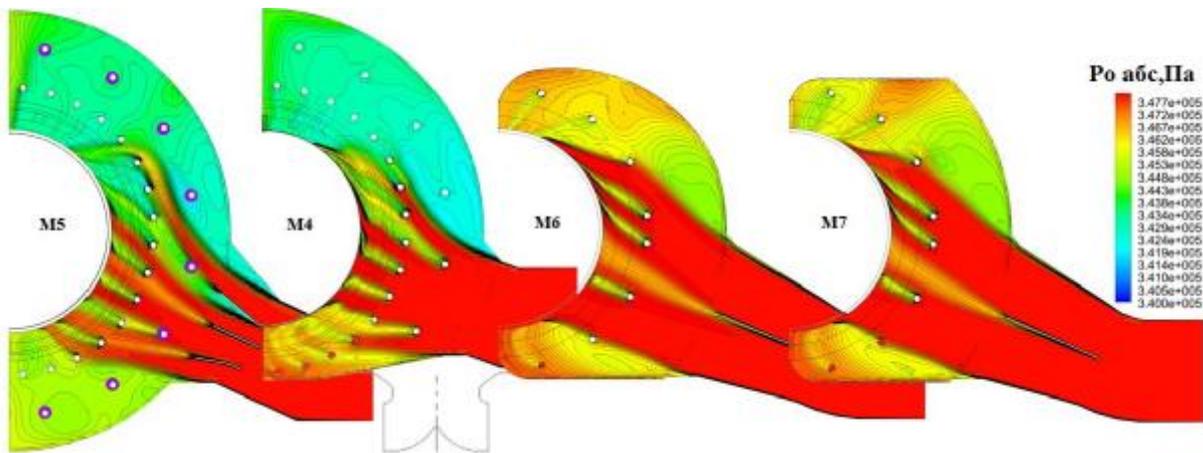


Рис. 2 – Изолинии полного давления в некоторых вариантах патрубка с сопряжением труб, силовыми и направляющими элементами

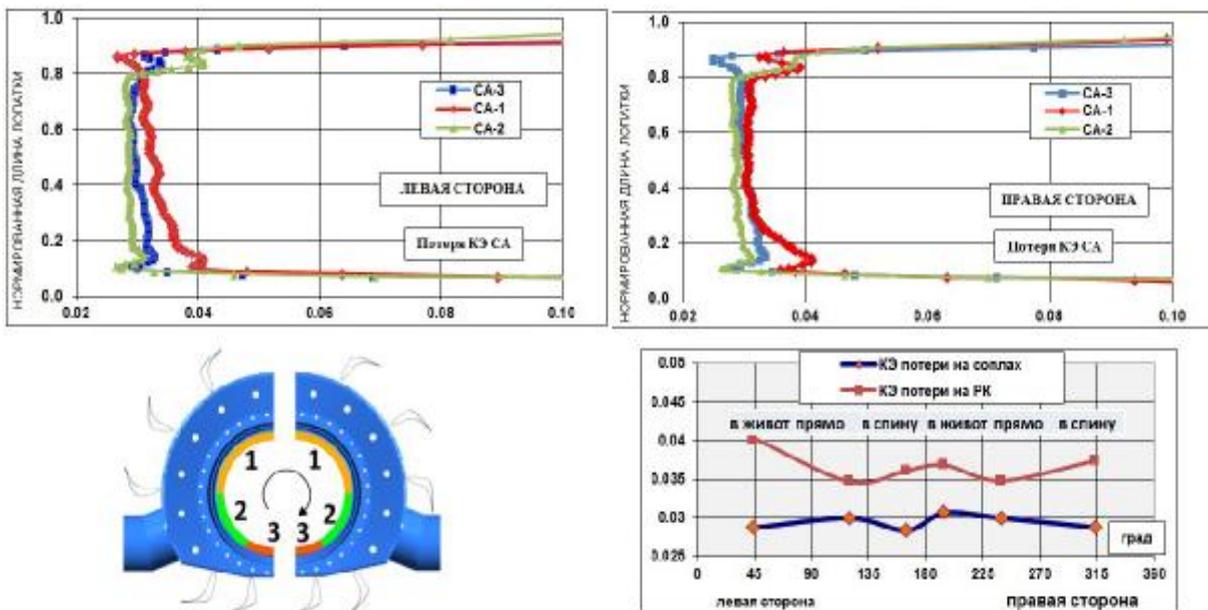


Рис. 3 – Неравномерность потерь КЭ на СА ступени № 1. Расчёт по 6 секторам

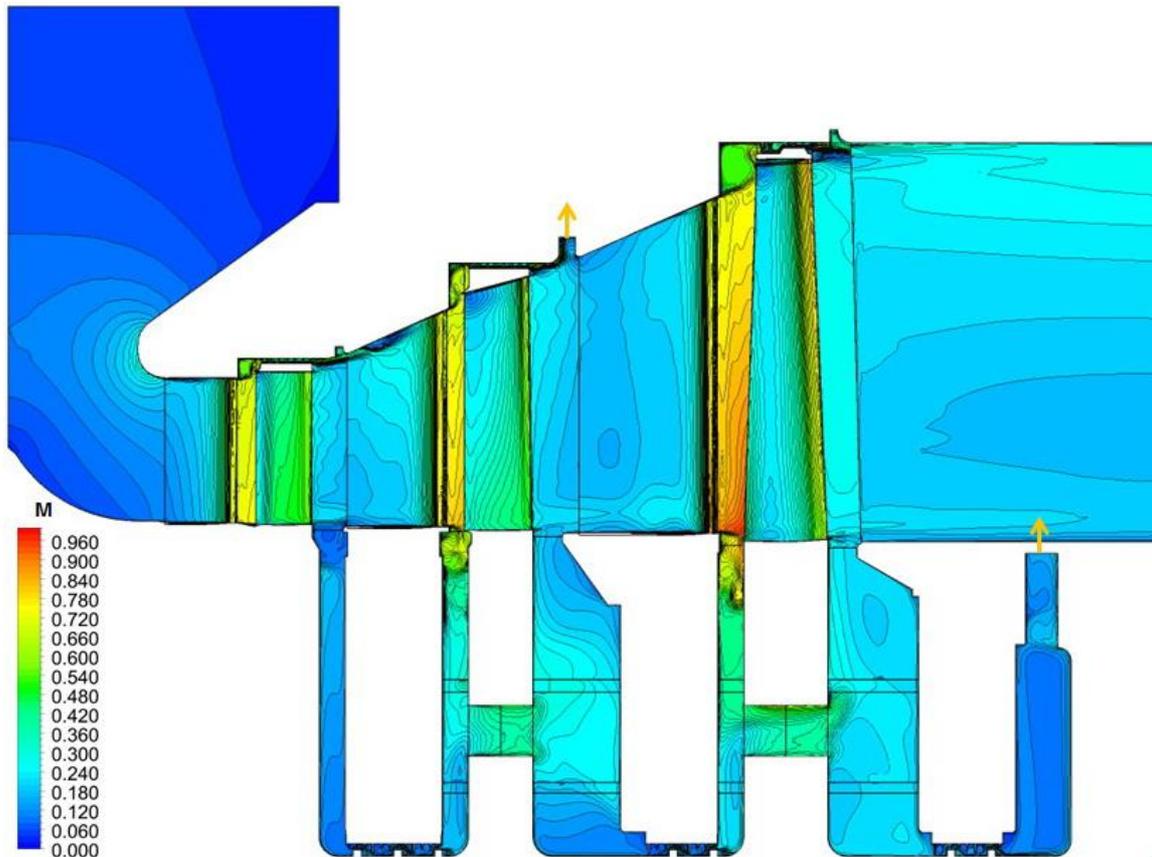


Рис. 4 – Ізолинии относительного числа Маха для исходного отсека

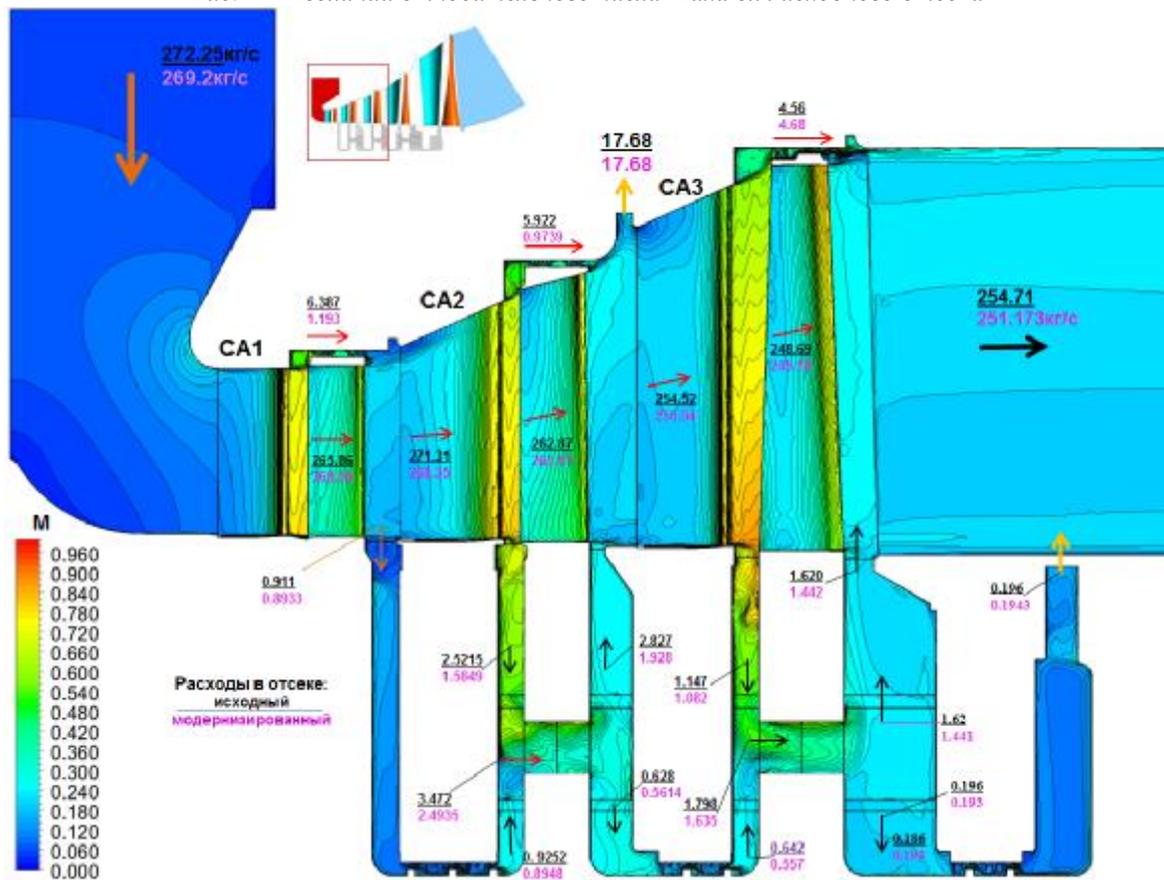


Рис. 5 – Ізолинии относительного числа Маха для модернизированного отсека

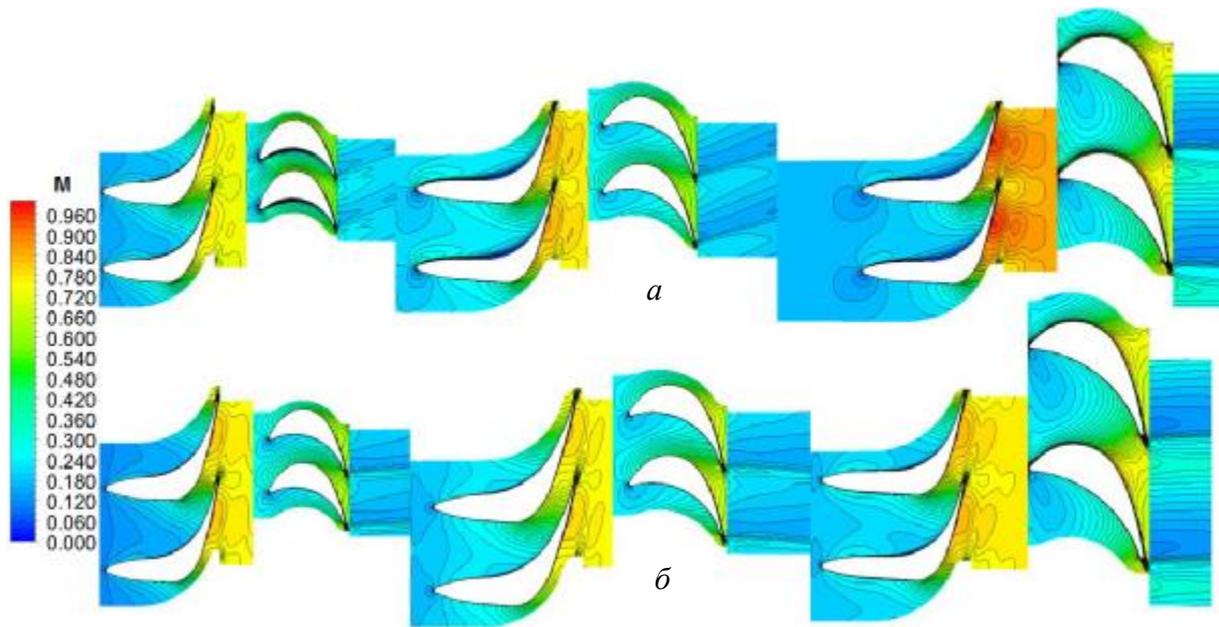


Рис. 6 – Изолинии относительного числа Маха для отсека на среднем радиусе облопачивания:
а – исходного; б – модернизированного

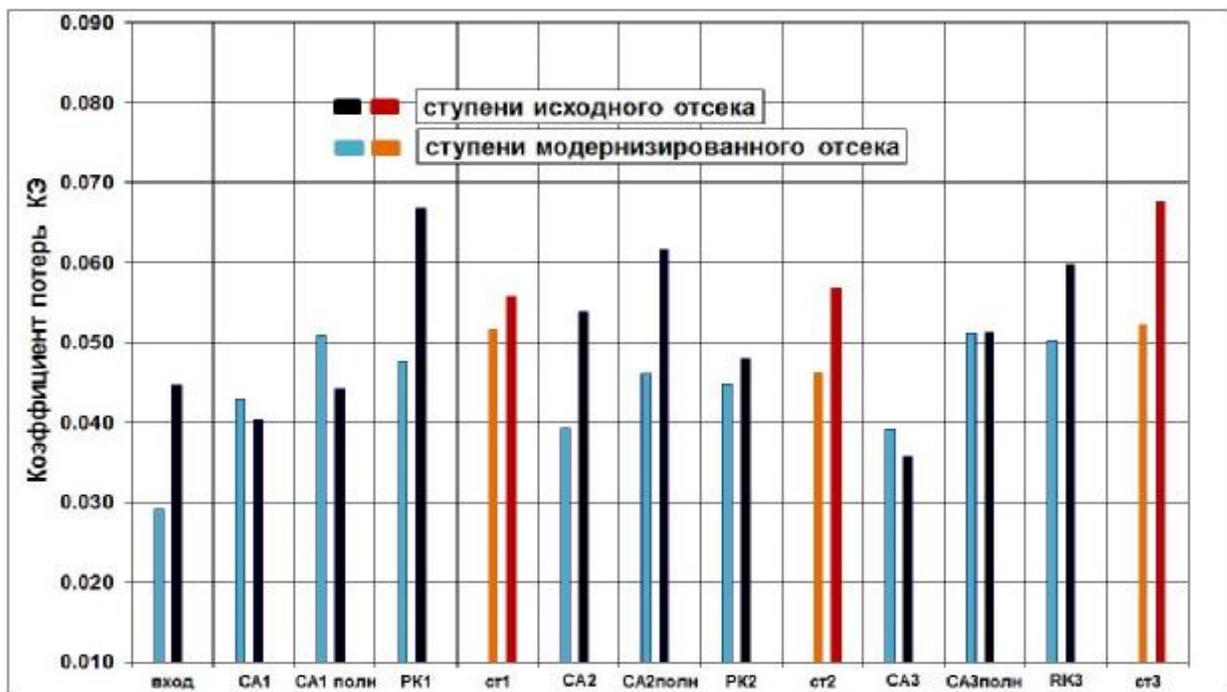


Рис. 7 – Потери КЭ на каналах и ступенях отсеков без включения межвенцового зазора и с включением (CAполи)

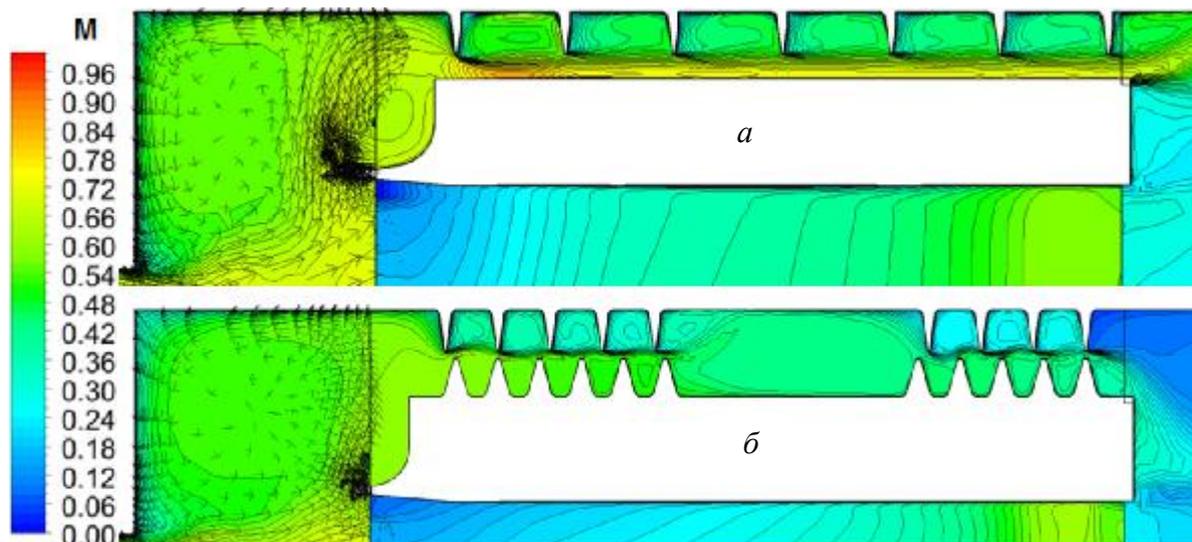


Рис. 8 – Линии уровня относительного числа Маха в надбандажном уплотнении для РК1: а – в исходном исполнении; б – модернизированном исполнении

Заключение

Представлены результаты численного эксперимента по совершенствованию аэродинамических и энергетических характеристик вариантов отсека трёх первых ступеней совместно с входным патрубком ЦНД турбины К-1250-6,9/25 на влажном паре с табличными свойствами при использовании равновесной модели течения. Формирование требований к математическим моделям и проведению численных исследований с учётом реальных граничных условий выполнено путём предварительного проведения комплекса верификационных численных расчётов.

Установлено, что основные потери полного давления в исходной конструкции входного патрубка возникают в коллекторе и в канале сопряжения подводящей трубы и коллектора. Дополнительные потери вносит наличие стержневой силовой системы. Устройство эффективного диффузорного сочленения ресивера с кольцевой камерой и профилированных выгородок в верхней и нижней частях патрубка обеспечивает заметное снижение потерь.

Улучшение формы канала в кольцевом коллекторе за счёт профилированных листовых вставок и колена от трубы ресивера уменьшает коэффициент внутренних потерь в 2 раза. Увеличение осевой длины радиально-осевого канала и уменьшение высоты рассекателя практически не влияет на величину внутренних потерь, но существенно (на 45 %) снижает коэффициент окружной неравномерности статического давления перед ступенью. С учётом дополнительного улучшения формы каналов коллектора и колена ресивера коэффициент неравномерности уменьшается на 58,7 %. На основе поэлементной оценки эффективности

разработан итоговый вариант входного патрубка (М7).

Углы натекания на входные кромки СА в левой и правой частях патрубка практически симметричны, т.е. обратное влияние ступеней на патрубков мало. Для подвода со встречными трубами потери КЭ на соплах 1-й ступени на разных секторах отличаются, особенно в концевых зонах; на секторах РК1 показывают равномерное распределение потерь и нагрузки. Это влияние практически не распространяется на последующие ступени.

Исследования отсека трёх первых ступеней с учётом протечек через уплотнения и разгрузочные отверстия, отсосов и подсосов, отбора пара показали, что корневые отсосы за СА соответствуют рекомендациям МЭИ [9]. Усовершенствование сопряжения сопловых и рабочих решёток в ступенях отсека и их корректировка с учётом изменения располагаемых теплоперепадов позволили снизить коэффициент потерь КЭ для 1-ой ступени на 7,5 %, 2-ой – на 18,7%, 3-ей ступени – на 22,7 %.

Конструкция разношаговых многоросельных уплотнений рабочих венцов 1-й и 2-й ступеней в реальных граничных условиях показали сравнительно высокую эффективность и слабую зависимость расхода от осевого положения ротора относительно статора.

Разработанные математические модели и методические аспекты численных исследований указывают на возможность постановки численного эксперимента по определению и совершенствованию газодинамических и энергетических характеристик проточной части цилиндра паровой турбины.

Список литературы

- 1 **Швецов, В. Л.** Аэродинамическое совершенствование паровпускного отсека трех ступеней ЦНД с помощью численного эксперимента [Электронный ресурс] / **В. Л. Швецов, И. И. Кожешкурт, В. А. Конеv, В. Г. Солодов, А. А. Хандримайлов** // Материалы XV междунар. н/т конф. «Соверш. турбоустановок методами матем. и физ. моделирования» 15 сентября 2015. – Змиев : ИПМаш НАНУ, 2015. – 10 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.
- 2 Сертификат гос. регистрации авторских прав № 5921 Украины. Научно-прикладной программный комплекс *MTFS®* для расчёта трёхмерных 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.
- 3 **Солодов, В. Г.** Опыт трёхмерного моделирования сжимаемых вязких турбулентных течений в турбомашинах [Текст] / **В. Г. Солодов, Ю. В. Стародубцев** // В кн: Аэрогидродинамика: Проблемы и перспективы. – Харьков : Нац. Аэрокосм. Ун-тет «ХАИ», 2004. – С. 134–157.
- 4 **Солодов, В. Г.** Моделирование турбулентных течений: Расчёт больших вихрей [Текст] / **В. Г. Солодов**. – Харьков : ХНАДУ, 2011. – 168 с. – ISBN 978-966-303-371-6.
- 5 **Шубенко, А. Л.** Совершенствование термогазодинамических характеристик проточных частей мощных паровых турбин [Текст] / **А. Л. Шубенко, В. Л. Швецов, В. Н. Голощапов, В. Г. Солодов, С. В. Алехина**. – Харків : Цифрова друкарня № 1, 2013. – 172 с. – ISBN 978-617-7017-32-4.
- 6 **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст]. – М. : Машиностроение, 1975. – 559 с.
- 7 **Орлик, В. Г.** Сравнительное исследование прямо-точных и ступенчатых лабиринтовых уплотнений для турбомашин [Текст] / **В. Г. Орлик, А. З. Скоморовский** // Энергомашиностроение. – 1979. – № 5. – С. 10–12.
- 8 Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин [Текст] / под ред. **В. А. Черникова**. – Ленинград : Машиностроение, 1980. – 263 с.
- 9 **Щегляев, А. В.** Паровые турбины [Текст] / **А. В. Щегляев**. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 416 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Shvetsov, V. L., Kozheshkurt, I. I., Konev, V. A., Solodov, V. G. and Khandrimailov, A. A.** (2015), ²Ajerodinamicheskoe sovershenstvovanie parovpusknogo отсека treh stupenej CND s pomoshh'ju chislennogo jeksperimenta [Aerodynamic improvement of L.P.C. inlet pipe compartment of three stages with the help of a numerical experiment]², *Reports of XV Intern conf. ²An Improvement of turbine units by the methods of mathem and phys. modeling² 15 Sept.* [Electronic], IPMash of NASU, Zmiev, Ukraine (accessed 28 September 1015).
- 2 **Solodov, V. G. and Starodubtsev, Yu. V.** (2002) *Scientific Application Program Complex MTFSS® for Calculation of 3D Viscous Turbulent Flows of Liquids and Gases in the Regions of Arbitrary Form, Sertifikat Gos. Registr. Avtorskikh Prav,* UGAASP, No. 5921, Ukraine.
- 3 **Solodov, V. G. and Starodubtsev, Yu. V.** (2004), ²Opyt trehmernogo modelirovaniya szhimaemykh vjazkih turbulentnyh techenij v turbomashinah [The experience of 3D modeling compressible viscous turbulent flows in turbomachinery]², *Books: Ajerogidrodinamika: Problemy i perspektivy, Nac. Ajerokosm. Un-tet ²HAI², Kharkov*, pp. 134–157.
- 4 **Solodov, V. G.** (2011), *Modelirovanie turbulentnyh techenij: Raschet bol'shikh vihrej [Turbulent flow modeling. Large eddy simulation]*, Publishing house KhNAHU, Kharkov, Ukraine, ISBN 978-966-303-371-6.
- 5 **Shubenko, A. L., Shvetsov, V. L., Goloschapov, V. N., Solodov, V. G. and Alexina, S. V.** (2013) *Sovershenstvovanie termo-gazodinamicheskikh harakteristik protochnih chastej moshhnyh parovih turbin [An improvement of thermo and gas dynamic characteristics of flow path of power steam turbine units]*, Cifrova Drukarnia No. 1, Kharkov, Ukraine. – ISBN 978-617-7017-32-4.
- 6 **Idelchik, I. E.** (1975), *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam [Handbook of hydraulic resistance]*, Mashinostroenie, Moscow, Russian.
- 7 **Orlik V. G. and Skomorovsky, A. Z.** (1979), ²Sravnitel'noe issledovanie prjamotochnyh i stupenchatyh labirintovyh uplotnenij dlja turbomashin [A comparative study of once-through and staggered labyrinth seal for Turbomachinery]², *Jenergomashinostroenie [Energomashinostroenie]*, no. 5. pp. 10–12.
- 8 **Chernikov V. A.** (ed.) (1980), *Ajerodinamicheskie harakteristiki stupenej teplovyh turbin [Aerodynamic Characteristics of Heat Turbine Stages]*, Mashinostroenie, Leningrad, Russian.
- 9 **Sheglaev, A.V.** (1993), *Parovye turbiny [Steam Turbines]*, Jenergoatomizdat [Energoatomizdat], Moscow, Russian.

Сведения об авторах (About authors)

Солодов Валерий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный автомобильно-дорожный ун-тет (ХНАДУ), заведующий кафедрой «Теоретическая механика и гидравлика»; г. Харьков, Украина; e-mail: solodov.v@gmail.com. ORCID 0000-0001-9607-8184.

Solodov Valerii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department ²Theoretical mechanics and Hydraulics², Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkov, Ukraine; e-mail: solodov.v@gmail.com.

Хандримайлов Андрей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный ун-тет (ХНАДУ), доцент кафедры «Теоретическая механика и гидравлика»; г. Харьков, Украина; e-mail: khandrym@gmail.com. ORCID 0000-0003-4403-3392.

Khandrymailov Andrei – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Department ²Theoretical mechanics and Hydraulics², Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkov, Ukraine; e-mail: khandrym@gmail.com.

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

Shvetsov Victor – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), chief-designer of steam turbines, Private Joint Stock Company ²Turboatom², Kharkov, Ukraine; e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua.

Кожешкурт Иван Иванович – начальник отдела, Публичное акционерное общество «Турбоатом», г. Харьков, Украина; e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua

Kozheshkurt Ivan – Head of Department, Private Joint Stock Company ²Turboatom², Kharkov, Ukraine; e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua.

Конеv Владимир Афанасьевич – ведущий инженер-конструктор, Публичное акционерное общество «Турбоатом», г. Харьков, Украина; e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua.

Konev Vladimir – Lead design engineer, Private Joint Stock Company ²Turboatom², Kharkov, Ukraine; e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Солодов, В. Г. Исследование аэродинамических и энергетических характеристик отсека ступеней с патрубком паровпуска ЦНД мощной паровой турбины с учётом протечек [Текст] / **В. Г. Солодов, А. А. Хандримайлов, В. Л. Швецов, И. И. Кожешкурт, В. А. Конев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 6–15. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.01.

Please cite this article as:

Solodov, V., Khandrimailov, A., Shvetsov, V., Kozheshkurt, I. and Konev, V. (2016), ²Investigation of aerodynamic and energy characteristics of L.P.C. compartment of stages with inlet pipe and leak system for powerful steam turbine unit². *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 6–15, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.01.

Будь ласка посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Солодов, В. Г. Дослідження аеродинамічних і енергетичних характеристик відсіку ступенів з патрубком паровпуску ЦНТ потужної парової турбіни з урахуванням протічок [Текст] / **В. Г. Солодов, А. О. Хандримайлов, В. Л. Швецов, І. І. Кожешкурт, В. А. Конев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 6–15. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.01.

АНОТАЦІЯ Розглянуто результати розрахунково-конструкторських розробок і чисельних досліджень вхідного патрубка з першим ступенем і відсіку перших трьох ступенів з урахуванням відбору пари, протікання через діафрагмові, надбандажні ущільнення та розвантажувальні отвори в дисках ЦНТ турбіни К-1250-6,9/25. Представлені деякі методичні аспекти та результати вдосконалення досліджених об'єктів за допомогою чисельного експерименту.

Ключові слова: вхідний патрубок, відсік ступенів, чисельна модель, ЦНТ, парова турбіна.

Поступила (received) 15.01.2016