

В. Г. СОЛОДОВ, В. Л. ШВЕЦОВ, В. А. КОНЕВ

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦНД МОЩНОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ С УЧЕТОМ ПРОТЕЧЕК

АННОТАЦИЯ Рассмотрены результаты расчетно-конструкторских разработок и численных исследований проточной части цилиндра низкого давления (ЦНД) турбины К-1250-6,9/25 с учетом отборов пара, протечек через диафрагменные, надбандажные уплотнения и разгрузочные отверстия в дисках, и отсоса влажного пара из межвенцового зазора последних ступеней. Представлены некоторые методические аспекты и результаты совершенствования исследованных объектов с помощью численного эксперимента.

Ключевые слова: ЦНД, проточная часть, численная модель, отборы, уплотнения.

V. SOLODOV, V. SHVETSOV, V. KONEV

NUMERICAL MODEL OF L.P.C. FLOW PATH WITH LEAK SYSTEM OF POWERFUL STEAM TURBINE UNIT

ABSTRACT The results of computational and engineering developments and numerical studies of low pressure cylinder of five stages are represented, taking into account the steam extraction, leakages under the diaphragms, shroud seals and discharge openings in the disks of the turbine K-1250-6.9/25. All the computations were done by **MTFS[®] software**, ensured the integration of Reynolds-Favre averaged Navier-Stokes equations, were based on the model of one speed wet steam flow without droplets and super cooling were not taken into account. The sectorial approach was applied to description of the interaction of the inlet pipe, the group stages and exhaust hood. The stages were considered in steady state formulation. The initial data and boundary conditions were taken basing on thermal design of "TURBOATOM". The calculated domains were approximated by unstructured hexahedral meshes. The rigid walls were supposed adiabatic under condition of adhesion. The turbulent phenomena were described basing on the SST model of F.Menter. Some methodological aspects and the directions for improving of studied facilities by numerical experiment by **MTFS[®] code** are discussed. The initial version of low pressure cylinder of slow-motion steam turbine K-1250-6.9/25 is considered. The variants of Inlet are considered taking in view the parameters: height and form of flow divider, throat size etc. It is shown, that blade №4 needs to be improved because of aerodynamically imperfect profile in wire zone. Also blades № 4, 5 flow around under attacks angle. So these stages need to be adjusted.

Key words: L.P.C., flow path, stages, numerical model, extractions, seals.

Введение

Создание новых и модернизация существующих ЦНД на современном уровне требует выполнения комплекса расчетно-конструкторских разработок на базе наиболее эффективных новых и апробированных решений в турбостроении с использованием численного 3D эксперимента.

Данная работа является развитием работы [1] в процессе разработки проекта новой паровой турбины К-1250-6,9/25 с длиной рабочей лопатки последней ступени 1650 мм.

Цель работы

Цель работы – разработка вычислительной модели проточной части ЦНД, включающей входной и выхлопной патрубки, и ступени с вариантами диафрагменных и надбандажных уплотнений, промежуточными отборами пара, разгрузочными отверстиями в дисках рабочих колес и отсосов влажного пара из межвенцового зазора последних ступеней. Целью работы также являлась оценка возможностей применения 3D расчетов проточной части для обеспечения эффективной замены основного объема физических экспериментов.

1 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 алгоритма [3], обеспечивающего эффективное расщепление вычислительного процесса для многопроцессорных платформ. Расчётные подобласти аппроксимировались неструктурированными гексагональными сетками. Твёрдые стенки предполагались адиабатическими с условием прилипания. Турбулентные эффекты описывались на основе SST модели Ментера [4]. Расчёты выполнены на основе табличной модели влажного пара и приближения равновесной конденсации.

Входной патрубок симметричен относительно продольной и поперечной вертикальных плоскостей. Его коллектор содержит внутренние структурные элементы и два подвода в нижней половине. Подробное описание вариантов входного патрубка дано в [1]. С целью экономии вычислительных ресурсов использован секторный под-

ход к осреднению [3] на интерфейсах пространства патрубка и каналов диафрагмы 1-й ступени. В вариантах расчетов на половине окружности подвода использовалось до трех секторов интерфейса (рис. 1б). Каждому сектору соответствовала одна проточная часть ряда ступеней.

На выходе из проточной части присутствовал вариант модели выхлопного патрубка без внутренних элементов (рис. 1г, д). Передача параметров от ступени к патрубку происходила с осреднением по окружной координате, то есть окружная неравномерность от выхлопного патрубка не учитывалась в модели проточной части ЦНД.

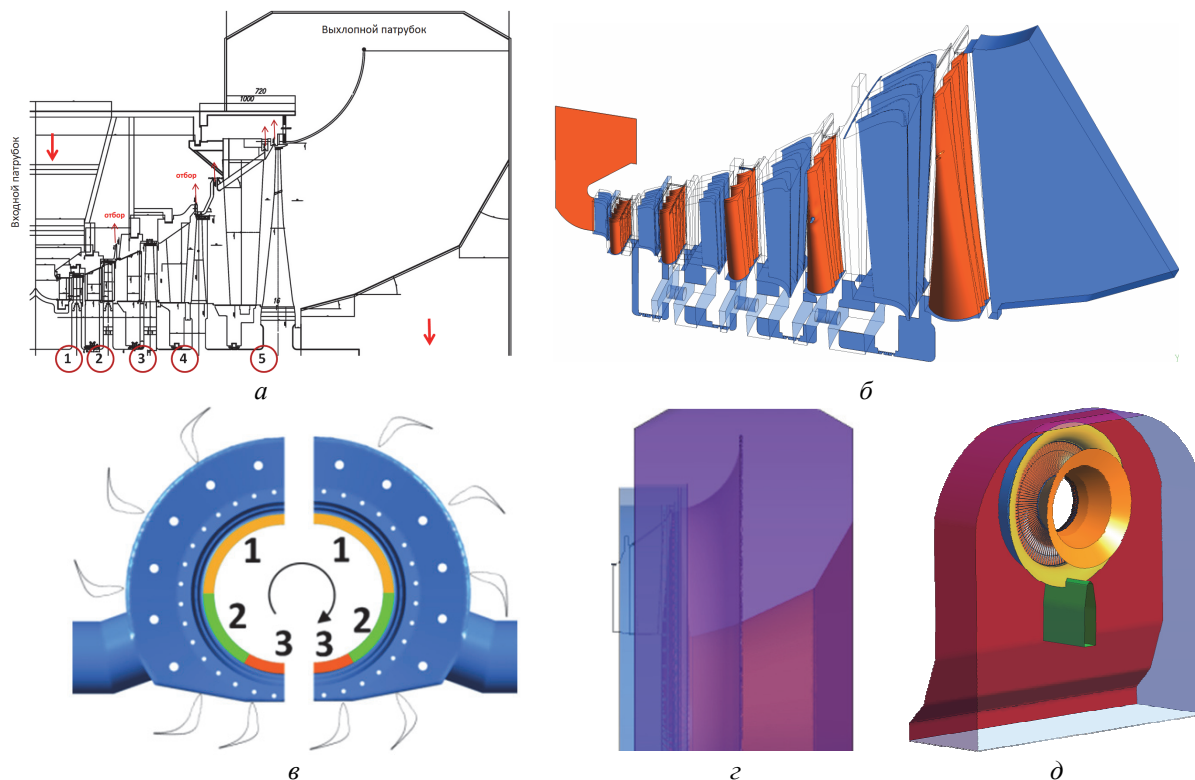


Рис. 1 – Схемы элементов проточной части ЦНД и расчетной области: а, б – схема отсека; в – входной патрубок; г, д – сечения выхлопного патрубка

Мощности сеточного разбиения по элементам проточной части ЦНД в среднем составляли около 10 млн. ячеек в проточной части патрубков и до 30 млн. ячеек в ступенях отсека. Все каналы уплотнений в ступенях и междисковые разгрузочные отверстия моделировались в трехмерной постановке в рамках условий периодичности.

Численное моделирование течения в вариантах ЦНД проводилось в условиях отсутствия возможности экспериментальной проверки получаемых результатов. Поэтому стратегия численного эксперимента основывалась на опыте расчетных исследований двухступенчатых и трехступенчатых отсеков с паровпуском [1], двухступенчатых переходных отсеков с промежуточным отводом пара [5], выхлопных отсеков [6], а также основывалась на предварительном выборе вычислительной сетки для течения через одиночное уплотнение путем сравнения с известными экспериментальными данными [1].

В математической модели детально описаны все основные геометрические параметры, определяющие характеристики проточной части пяти

ступеней ЦНД, в том числе надбандажные и диафрагменные уплотнения, разгрузочные отверстия, отборы и отсосы пара.

Моделирование выполнено для номинального режима работы ЦНД на основе данных теплового расчета. При этом на входных сечениях подводящих труб входного патрубка задавались полные параметры потока без завихренности и нулевая влажность. На выходе из выхлопного патрубка фиксировалось постоянное статическое давление.

2 Некоторые результаты исследования проточной части ЦНД

Исходный вариант ЦНД тихоходной паровой турбины К-1250-6,9/25 представлен на схеме проточной части (рис. 1б). Основные данные исходной конструкции приведены в табл. 1 и в части первой, второй и третьей ступеней соответствуют исходному варианту облопачивания входного отсека [1].

Таблица 1 – Геометрические характеристики ступеней

Параметры	Обозначение	№ ступени				
		1	2	3	4	5
Высота сопла, мм	L_c	225	335	521	829	1523
Корневой диаметр сопловой решетки, мм	$D_{с.к}$	3052	3040	3020	2980	2930
Углы выхода потока из сопла, град	$4\alpha_{1ср}$	14,3	14,6	13,8	16,1	16,3
Количество сопловых лопаток, шт.	z_c	142	142	142	68	66
Количество рабочих лопаток, шт.	$z_{л}$	220	170	100	108	112
Длина рабочих лопаток, мм	$L_{л}$	238	394	590	910	1650
Корневой диаметр рабочей решетки, мм	$D_{л.к}$	3046	3030	3005	2970	2900
Веерность рабочих лопаток	$D_{л}/L_{л}$	13,8	8,69	6,09	4,26	2,76
Угол корневого меридионального раскрытия, град	$\gamma_{л.к}$	0	0	0	0	0
Угол периферийного раскрытия, град	$\gamma_{л.п}$	0	15	0	0	0
Периферийная перекрыша (радиальная), мм	$\Pi_{п}$	10	32,5	61,5	87	109
Углы выхода потока из ступени, град	$\beta_{2ср}$	20,7	19,0	18,8	19,7	31,4
Уплотнение надбандажное	–	лабиринтное прямоточное				
Радиальный зазор, мм	d_r	3	3,5	4	5,5	9,25
Количество гребней на статоре, шт	Z	7	8	2+3	4	–
Уплотнение диафрагменное	–	ступенчатое				

2.1 Методика обработки полей газодинамических величин

Интегральные массовые и энергетические характеристики элементов проточной части вычислялись в характерных сечениях: на входе в патрубков, по кромкам сопловых и рабочих лопаток. Осреднение параметров в этих сечениях выполнялось по методике [7]. Интегральные внутренние потери полного давления и кинетической энергии (КЭ) на участках между сечениями определялись по общепринятым формулам [7]. Для каналов сопел и рабочего колеса (РК) потери КЭ вычислялись по сечениям на расстоянии 2–3 диаметров входных/выходных кромок и таким образом не учитывали потери КЭ в надбандажных и диафрагменных протечках, а также полные потери вследствие отборов и отсосов пара.

2.2 Анализ аэродинамических характеристик отсека ступеней

Обсуждение вариантов модели входного патрубка проводилось в [1] по параметрам: высота и конфигурация расщепителя, размер горла, ширина и осевая длина осерадиального канала, внутренние очертания коллектора и форма канала сопряжения подводящей трубы (ресивера) с коллектором. В данном исследовании принят вариант входного патрубка М4 из работы [1].

В расчетах проточной части выполнялось осреднение параметров потока в зазоре вдоль окружности интерфейса между патрубком и входом в подключенную ступень. Исходя из малости окружных градиентов параметров на интерфейсе «ступень–патрубок», выбраны секторы осреднения интерфейса размером в 30°, 60°, 90° [1]. Кроме того, учитывалось, что патрубок спроектирован с

установкой разделительных стенок в плоскости симметрии.

Результаты по выбору выхлопного патрубка не приведены в связи с ограниченным объемом статьи.

Сопоставление результатов по структуре течения и потерям КЭ показывают близкие значения, как для случая трехступенчатого отсека [1], так и ЦНД в целом. Для трехступенчатого отсека [1] наблюдаются отличия в сравнении с ЦНД по расходам в сечениях диафрагменных протечек, что связано с неадекватным моделированием противодавления за третьей ступенью трехступенчатого отсека, а также отсутствием в нем третьего разгрузочного отверстия. Расходы через надбандажные протечки первых двух рабочих венцов практически совпадают с таковыми для трехступенчатого отсека.

Течение в ступенях ЦНД в целом соответствует данным теплового расчета по зорам в среднем сечении. Температура пара к выходу из патрубка снижается от 430 К до 295 К, за кромками РЛ № 5 и в струе над бандажом – до 290 К; влажность, отсутствующая на входе в ЦНД, появляется за сопловым аппаратом (СА) № 1, на выходе ступени № 3 достигает 7 % в ядре потока, в зазоре и на выходе из 5-й ступени – 15–16 %, при этом периферийные и корневые пояса имеют пониженную влажность из-за протечек в уплотнениях (рис. 3). Первые три ступени работают в дозвуковом режиме, максимальное число Маха 0,95 достигается локально в корневой зоне межвенцового зазора 3-ей ступени (рис. 2). Влажность за РЛ 4-й ступени достигает 10 %, в нижней части зазора между СА № 5 и РЛ № 5 и за выходными кромками РЛ № 5 локально достигает 17 %. При этом температура снижается в соответствии с таблицами водяного пара.

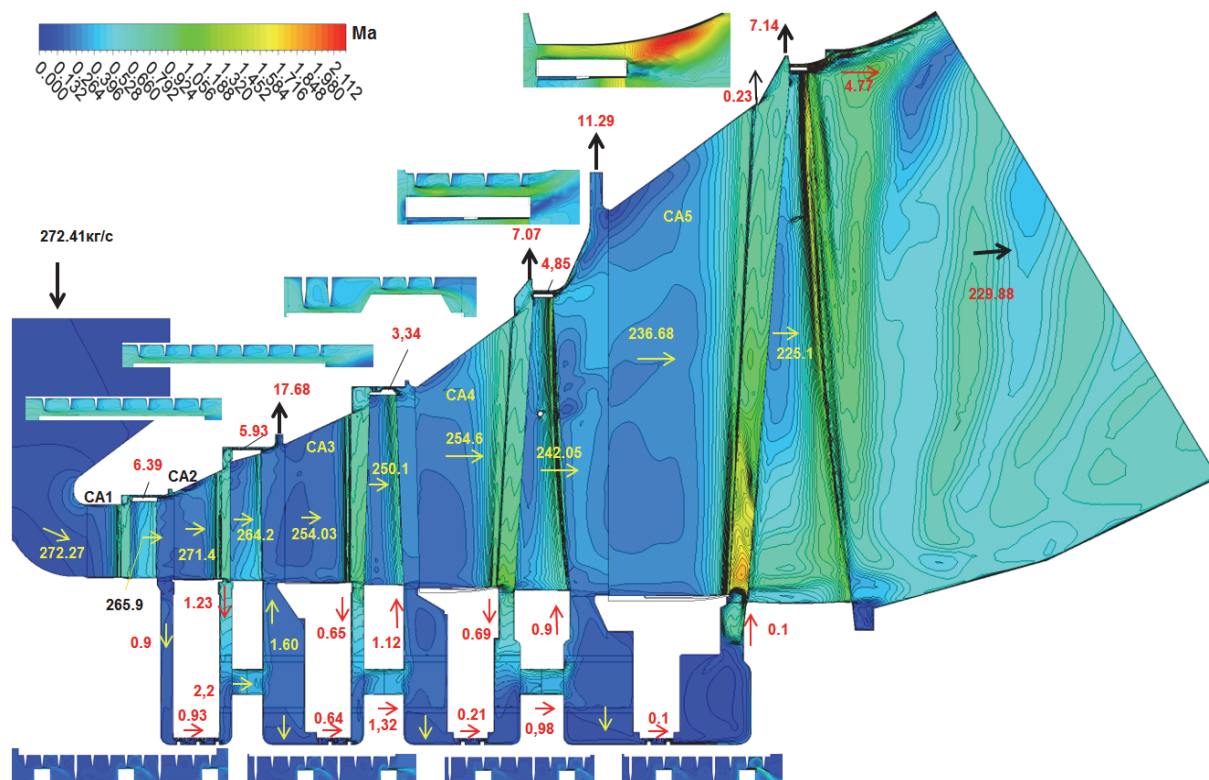


Рис. 2 – Поля относительного числа Маха на среднечанальной поверхности ЦНД и расходы

Заметные отличия в газодинамических и энергетических характеристиках первых трех ступеней в составе ЦНД и отсека [1] не наблюдаются. Судя по структуре потока, РЛ № 4 нуждается в доработке. След за проволокой РЛ № 4 заметен, прежде всего, из-за аэродинамически несовершенного профиля лопатки в этом поясе; для РЛ № 5 утолщение РЛ выполнено более совершенно и след практически не виден. Последнее подтверждается и предыдущими исследованиями авторов [6]. Также РЛ № 4, РЛ № 5 во входной части среднего пояса обтекаются под нерасчетными углами. Поэтому ступени нуждаются в корректировке. Обечайка диффузора патрубка обтекает безотрывно по всей длине за счет мощной закрученной струи надбандажной протечки (максимальное число Маха – 2,2) и специального профилирования контура диффузора. На периферийную зону проточной части оказывают влияние надбандажные протечки и отборы. За РЛ № 1 протечка прилегает к обечайке статора и провоцирует отрыв, который присоединяется на обечайке ближе к горлу СА № 2. За РЛ № 2 взаимодействие протечки (5,93 кг/сек) и основного потока обеспечивает прилегание потока и сток в отбор, которого, однако, не хватает для заполнения щели отбора (17,68 кг/сек) и верхний пояс СА № 3 оказывается незаполненным. Зона отбора за РЛ № 4 требует совершенствования.

Незаполненность отборной щели расходом и раскрытие проточной части на данном режиме

приводят к обтеканию СА № 5 в верхних поясах на нерасчетных углах (рис. 4), вблизи входных кромок возникает противоток.

В табл. 2 даны энергетические характеристики каналов и ступеней: интегральные потери КЭ канала, отнесенные к располагаемому перепаду на канал, потери ступени, отнесенные к перепаду на ступень, моменты на рабочих венцах и внутренние КПД ступеней, вычисленные по моментам на рабочих лопатках. Потери КЭ на сопловых каналах даны без учета межвенцовых зазоров (по кромкам) и с учетом зазоров. В целом можно отметить, что все решетки в ступенях в разной степени обтекаются с ударом.

Внутренний КПД ступени [7] определялся через внутреннюю мощность ступени, расход через ступень и разность энтальпий, которая вычислялась по полной энтальпии потока в сечении перед сопловым аппаратом ступени и адиабатическому значению энтальпии в сечении за ступенью. Внутренняя мощность ступени вычислялась через осевой момент на рабочем венце и угловую скорость вращения ротора. Таким образом, внутренний КПД ступени учитывал межвенцовые отборы и отсосы, перетекания в надбандажных и диафрагменных протечках.

Объем и детальность полученных результатов обеспечивают возможность разработки эффективных конструктивно-технологических решений для создания новых и модернизации существующих ЦНД на современном уровне.

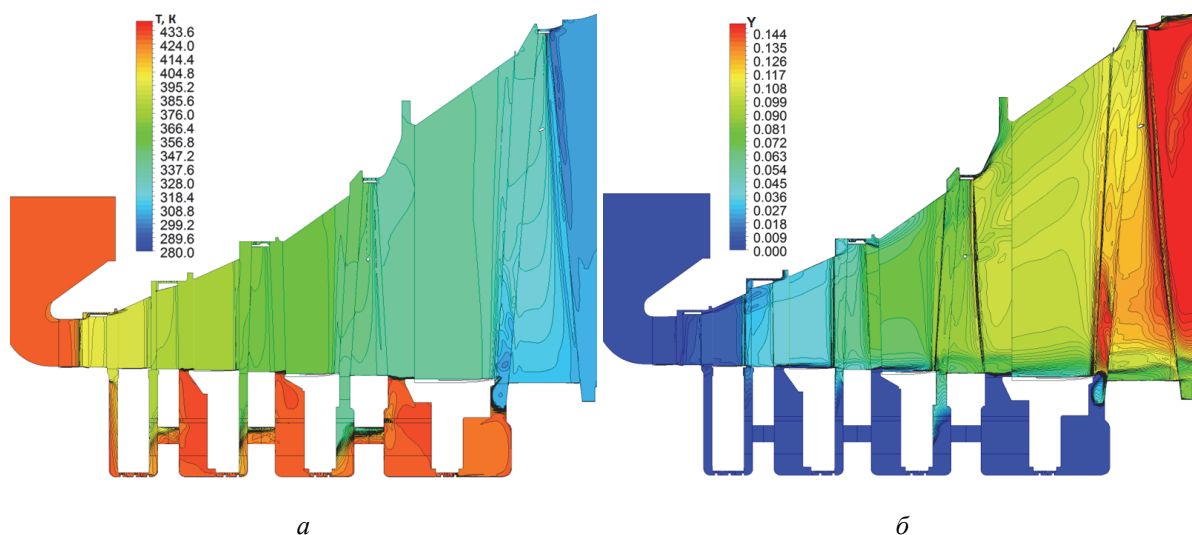


Рис. 3 – Среднеканальная поверхность решеток ЦНД:
 а – поле статической температуры; б – поле влажности

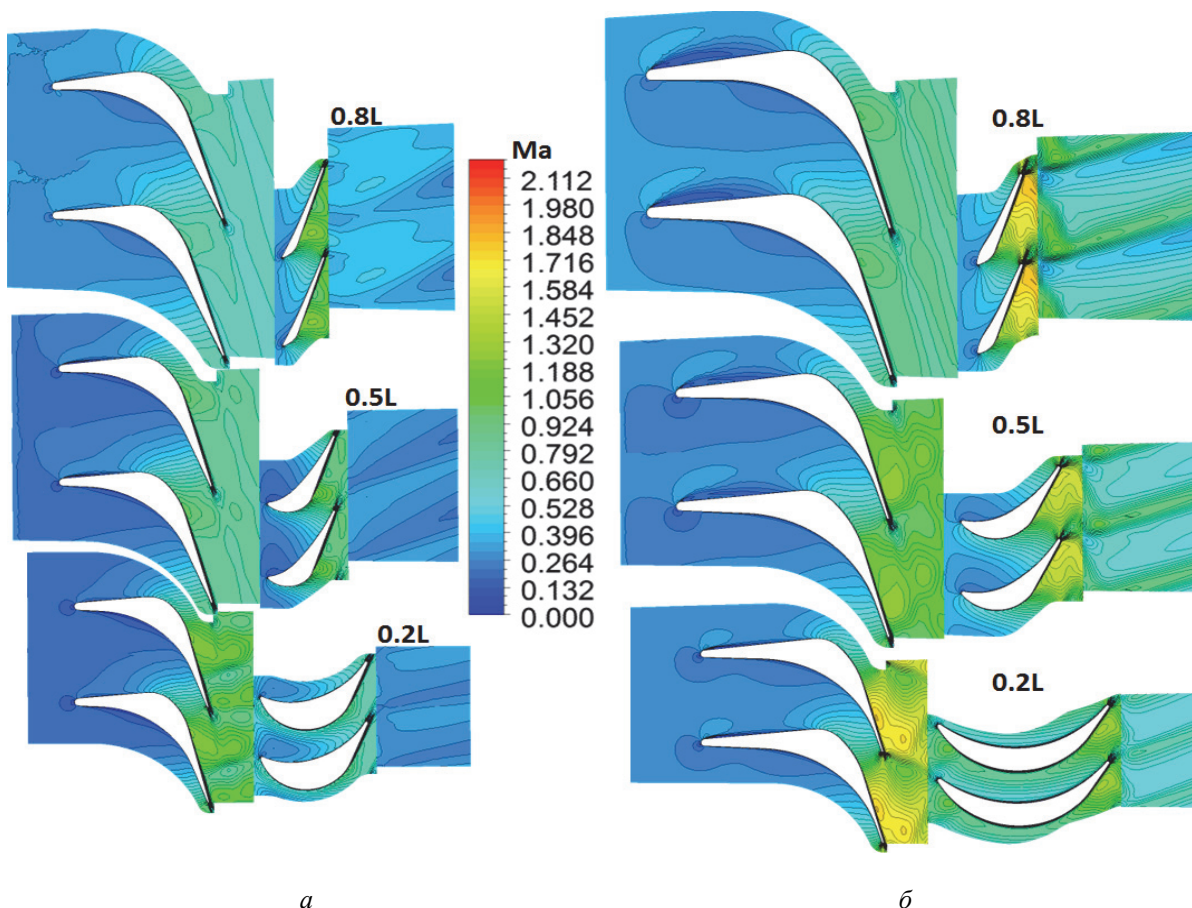


Рис. 4 – Изолинии относительного числа Маха: а – 4-я ступень ЦНД; б – 5-я ступень ЦНД

Таблица 2 – Энергетические характеристики ступеней

Параметр	вход	CA1	CA1 полн	PK1	ст1	CA2	CA2 полн	PK2	ст2	CA3	CA3 полн	PK3	ст3	CA4	CA4 полн	PK4	ст4	CA5	CA5 полн	PK5	ст5	ЦНД
КПД по моменту	–	–	–	0,915	–	–	–	0,932	–	–	–	0,911	–	–	–	0,862	–	–	–	0,754	–	–
Интегральные потери канала на канал, %	5,0	4,0	5,0	6,7	–	5,34	6,2	5,9	–	3,7	5,24	5,9	–	4,3	5,45	9,0	–	5,1	7,7	4,8	–	–
Интегральные потери ступени, %	–	–	–	–	5,6	–	–	–	5,8	–	–	–	7,0	–	–	–	8,0	–	–	–	7,6	8,0
Момент РК, Нм	–	–	–	620,12	–	–	–	866,61	–	–	–	1692,8	–	–	–	1585,2	–	–	–	2054,3	–	–
Расход, кг/с	272,4	272,3	272,3	265,9	–	271,4	–	264,2	–	254,0	–	250,1	–	254,5	–	242,1	–	236,7	–	225,1	–	–

Заключення

Представлена вычислительная модель варианта проточной части цилиндра низкого давления турбины К-1250-6,9/25 на влажном паре с табличными свойствами при использовании равновесной модели течения без учета переохлаждения, движения капель и пленочной влаги. Модель включает входной и выхлопной патрубки, и ступени с вариантами диафрагменных и надбандажных уплотнений, промежуточными отборами пара, разгрузочными отверстиями в дисках рабочих колес. Разработанная модель может применяться для исследования аэродинамики проточной части цилиндров высокого, среднего и низкого давления паровых турбин различной мощности.

Обсуждаются результаты численного эксперимента по совершенствованию аэродинамических и энергетических характеристик исходного варианта проточной части цилиндра низкого давления турбины К-1250-6,9/25.

Формирование требований к математическим моделям и проведению численных исследований с учетом реальных граничных условий выполнено путем предварительного проведения комплекса верификационных численных расчетов [1, 5, 6].

Опыт расчетных исследований [1, 6] показывает, что варианты расчеты отсека и ЦНД в целом на фиксированном по расходу режиме можно проводить при замене входного патрубка граничным условием в виде распределения расхода по радиусу в осесимметричной постановке. При использовании модели ЦНД для режимных расчетов с неизменным входным патрубком целесообразно ограничиваться областью входного патрубка от горла подвода.

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 **Солодов, В. Г.** Исследование аэродинамических и энергетических характеристик отсека ступеней с патрубком паровпуска ЦНД мощной паровой турбины с учётом протечек / **В. Г. Солодов, А. А. Хандримайлов, В. Л. Швецов, И. И. Кожевкурт, В. А. Конев** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 8(1180). – С. 6–15. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.01.
- 2 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 / **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 трехмерного моделирования сжимаемых вязких турбулентных течений в турбомашинах / **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: расчет больших вихрей / **В. Г. Солодов**. – Харьков : ХНАДУ, 2011. – 168 с.
- 5 **Шубенко, А. Л.** Совершенствование термогазодинамических характеристик проточных частей мощных паровых турбин / **А. Л. Шубенко, В. Л. Швецов, В. Н. Голощапов, В. Г. Солодов, С. В. Алехина**. – Харьков: Цифрова друкарня № 1, 2013. – 172 с.
- 6 **Швецов, В. Л.** Исследование аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД в диапазоне режимов / **В. Л. Швецов, И. И. Кожевкурт, В. А. Конев, В. Г. Солодов, А. А. Хандримайлов** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 16(1125). – С. 5–13. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X.
- 7 Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин / под ред. **Черникова В. А.** – Ленинград: Машиностроение, ЛО, 1980. – 263 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Solodov, V., Khandrimailov, A., Shvetsov, V., Kozheshkurt, I. and Konev, V.** (2016), "Investigation of aerodynamic and energy characteristics of L.P.C. compartment of stages with inlet pipe and leak system for powerful steam turbine unit". *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.
- 2 **Solodov, V. G. and Starodubtsev, Yu. V.** (2002), "The Scientific Application Software MTFs® for Calculation of 3D Viscous Turbulent Liquid and Gas Flows in Arbitrary Shape Domains", *Certificate of State Registration, Ukrainian State Agency of Copyrights and Related Rights*, No. 5921, Ukrainian.
- 3 **Solodov, V. G. and Starodubtsev, Yu. V.** (2004), "The experience of 3D modeling of compressible viscous turbulent flows in turbomachinery", *In book: Aerodynamics: Problems and Perspectives*, National Aerospace University "KhAI", Kharkov, pp. 134–157, Russian.
- 4 **Solodov, V. G.** (2011), Turbulent flow modeling. Large eddy simulation, *Publishing house KhNAHU*, Kharkov, Russian.
- 5 **Shubenko, A. L., Shvetsov, V. L., Goloschapov, V. N., Solodov, V. G. and Alexina, S. V.** (2013), An improvement of thermo- and gas dynamic characteristics of flow path of power steam turbine units, *Cifrova Drukarnia No. 1*, Kharkov, Russian.
- 6 **Shvetsov, V. L., Kozheshkurt, I. I., Konev, V. A., Solodov, V. G. and Khandrimailov, A. A.** (2015), "Studying Aerodynamic and Energetic Characteristics of the Exhaust Section of LPC", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 16(1125), pp. 5–13, ISSN 2078-774X, Russian.
- 7 **Chernikov, V. A.** (ed.) (1980), Heat Turbine Stages Aerodynamical Characteristics, *Mashinostroenie*, Leningrad, Russian.

Сведения об авторах (About authors)

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

Solodov Valerii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department "Theoretical mechanics and Hydraulics", Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkov, Ukraine.

Швецов Виктор Леонидович – кандидат технических наук, главный конструктор паровых турбин, ПАО «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 "Turboatom", Kharkov, Ukraine.

Конеv Владимир Афанасьевич – ведущий инженер-конструктор, Публичное акционерное общество «Турбоатом», г. Харьков, Украина; e-mail: vak1402@yandex.ru.

Konev Vladimir – Lead design engineer, Private Joint Stock Company "Turboatom", Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Солодов, В. Г. Численная модель проточной части ЦНД мощной паровой турбины с учетом протечек / **В. Г. Солодов, В. Л. Швецов, В. А. Конеv** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 6–12. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.01.

Please cite this article as:

Solodov, V., Shvetsov, V. and Konev, V. (2017), "Numerical Model of L.P.C. Flow Path With Leak System of Powerful Steam Turbine Unit", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1230), pp. 6–12, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.01.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Солодов, В. Г. Чисельна модель проточної частини ЦНД потужної парової турбіни з урахуванням протічок / **В. Г. Солодов, В. Л. Швецов, В. А. Конеv** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 6–12. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.01.

АНОТАЦІЯ Розглянуто результати розрахунково-конструкторських розробок і чисельних досліджень проточної частини циліндра низького тиску (ЦНТ) турбіни К-1250-6,9/25 з урахуванням відбору пари, протікання через діафрагмові, надбандажні ущільнення та розвантажувальні отвори в дисках і відсосів вологої пари з міжвінцевих зазорів останніх ступенів. Представлено деякі методичні аспекти та результати вдосконалення досліджених об'єктів за допомогою чисельного експерименту.

Ключові слова: ЦНТ, проточна частина, чисельна модель, відбори, ущільнення.

Поступила (received) 15.02.2017