

УДК 621.165

А. В. РУСАНОВ, чл.-корр. НАНУ, проф.; зав. отд. ИПМаш НАН України, Харьков;

А. Л. ШУБЕНКО, чл.-корр. НАНУ, проф.; зав. отд. ИПМаш НАН України, Харьков;

В. Л. ШВЕЦОВ, канд. техн. наук; главный конструктор паровых турбин ОАО «Турбоатом», Харьков;

А. В. СЕНЕЦКИЙ, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАН України, Харьков

РАЗРАБОТКА ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦВСД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-1250 НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНЫХ ВЯЗКИХ ТЕЧЕНИЙ

Представлены результаты расчётных исследований трехмерных течений в проточной части ЦВСД новой паровой турбины К-1250 ОАО «Турбоатом» для блоков атомных электростанций. Численные исследования выполнены с помощью программного комплекса *IPMFlow*. Проточная часть ЦВСД К-1250 спроектирована с использованием разработанного в ИПМаш НАН України метода параметризации и аналитического профилирования лопаток. Показано, что в предлагаемом ЦВСД за счет применения современных подходов к профилированию лопаточных аппаратов, а также формированию меридиональных обводов КПД проточных частей ЦВД и ЦСД без учета отборов пара составил 96,6 и 96,4 %, соответственно.

Ключевые слова: паровая турбина, цилиндр высокого давления (ЦВД), цилиндр среднего давления (ЦСД), проточная часть, пространственное течение, направляющие и рабочие лопатки, моделирование ступеней турбины.

Введение

На сегодняшний день турбины производства ОАО «Турбоатом» успешно работают на электростанциях более чем 45 стран Европы, Азии, Америки и Африки. Более 260 паровых турбин суммарной мощностью свыше 60 млн кВт изготовлены для тепловых электростанций, из них 55 турбин для 16 ТЭС дальнего зарубежья. Для 24 АЭС изготовлено 169 турбин суммарной мощностью более 60 млн кВт, из них 40 турбин для 7 АЭС дальнего зарубежья. Доля «Турбоатом» в поставках турбин для АЭС на мировом рынке составляет 13 %, по этому показателю ОАО «Турбоатом» занимает 4-е место в мире [1].

В последние 15–20 лет при проектировании проточных частей турбомашин широко применяют методы моделирования пространственных вязких течений, основанные на численном интегрировании уравнения Рейнольдса [2]. Их использование необходимо для обеспечения высокого уровня аэродинамического совершенствования турбоустановок, уменьшения объема экспериментальных исследований и сокращения времени проектирования.

В статье представлены результаты расчетных исследований трехмерных течений в проточной части ЦВСД новой паровой турбины К-1250 ОАО «Турбоатом» для блоков атомных электростанций.

Метод расчета течения

Для численного исследования трехмерных течений пара в проточной части паровой турбины применялся программный комплекс *IPMFlow*, являющийся развитием программ *FlowER* и *FlowER-U* [3, 4]. Математическая модель комплекса основана на численном интегрировании осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений

Варіюемими параметрами для соотношений (3) являются α_{2s} и y_0'' , подбор которых должен обеспечить заданную величину горла решетки O , а также минимальное значение максимальной кривизны на множестве кривых (1) [9]. Величина горла определяется по заданным значениям шага решетки и эффективному углу

$$O = t \cos \alpha_{2ef}.$$

После определения кривой спинки и вписывания входной и выходной кромок итерационно рассчитываются коэффициенты кривой (2) для корытца с использованием соотношений

$$\begin{cases} y_{\text{кор}}(x_{1\text{кор}}) = y_{1\text{кор}} \\ y'_{\text{кор}}(x_{1\text{кор}}) = \text{tg}(\alpha_1 - \Delta\alpha_1) \\ y''_{\text{кор}}(x_{1\text{кор}}) = \{y''_{\text{кор},0}\} \\ y_{\text{кор}}(x_{2\text{кор}}) = y_{2\text{кор}} \\ y'_{\text{кор}}(x_{2\text{кор}}) = \text{tg} \alpha_{2c} \end{cases}, \quad (4)$$

где x_{1c} , y_{1c} , x_{2c} , y_{2c} – координаты касания кривой корытца с окружностями входной и выходной кромок, которые определяются по заданному углу $\alpha_1 - \Delta\alpha_1$ на входной кромке и варьируемому углу α_{2c} на выходной кромке. Угол α_{2c} выбирается в интервале α_{co} и α_{2s} таким образом, чтобы обеспечить минимальное значение максимальной кривизны кривой корытца, либо задаётся равными $\alpha_{2s} - \Delta\alpha_2$ [10, 11].

Исходные данные для газодинамических расчетов и проектирования проточных частей ЦВД и ЦСД паровой турбины К-1250

Исходными данными для трехмерных газодинамических расчетов и проектирования проточных частей ЦВД и ЦСД паровой турбины К-1250 были результаты теплового расчета. Основные геометрические и газодинамические характеристики ЦВСД полученные в тепловом расчете представлены в табл. 1–4. На рис. 2 показан продольный разрез прототипа ЦВСД паровой турбины К-1250.

ЦВД состоит из 8 ступеней, образующих 3 отсека, состоящих из: 1–4, 5–6 и 7–8 ступеней соответственно, а ЦСД включает 3 ступени, образующих 2 отсека, состоящих из: 1 и 2–3 ступеней соответственно. Между отсеками расположены регенеративные отборы пара.

Таблица 1.

Основные геометрические характеристики ступеней проточной части ЦВД

№ ст.	$D_{\text{ср НА}}$, мм	$l_{\text{НА}}$, мм	$D_{\text{ср РК}}$, мм	$l_{\text{РК}}$, мм	$Z_{\text{НА}}$, шт	$Z_{\text{РК}}$, шт	α_1 , градус	β_2 , градус	β_1 , градус
1	1951,0	167,0	1956,0	172,0	56	68	13,04	20,55	27,75
2	1981,5	197,5	1993,0	209,0	56	68	13,05	19,70	27,75
3	2018,0	234,0	2033,0	249,0	56	68	13,30	19,35	27,75
4	2054,0	270,0	2069,0	285,0	50	60	13,25	19,50	27,75
5	2090,0	306,0	2107,0	323,0	50	60	13,05	19,30	27,75
6	2139,0	355,0	2158,0	374,0	66	56	13,85	18,80	36,00
7	2181,0	397,0	2203,0	419,0	66	54	14,55	18,90	43,50
8	2247,0	463,0	2279,0	495,0	66	52	16,10	19,40	51,10

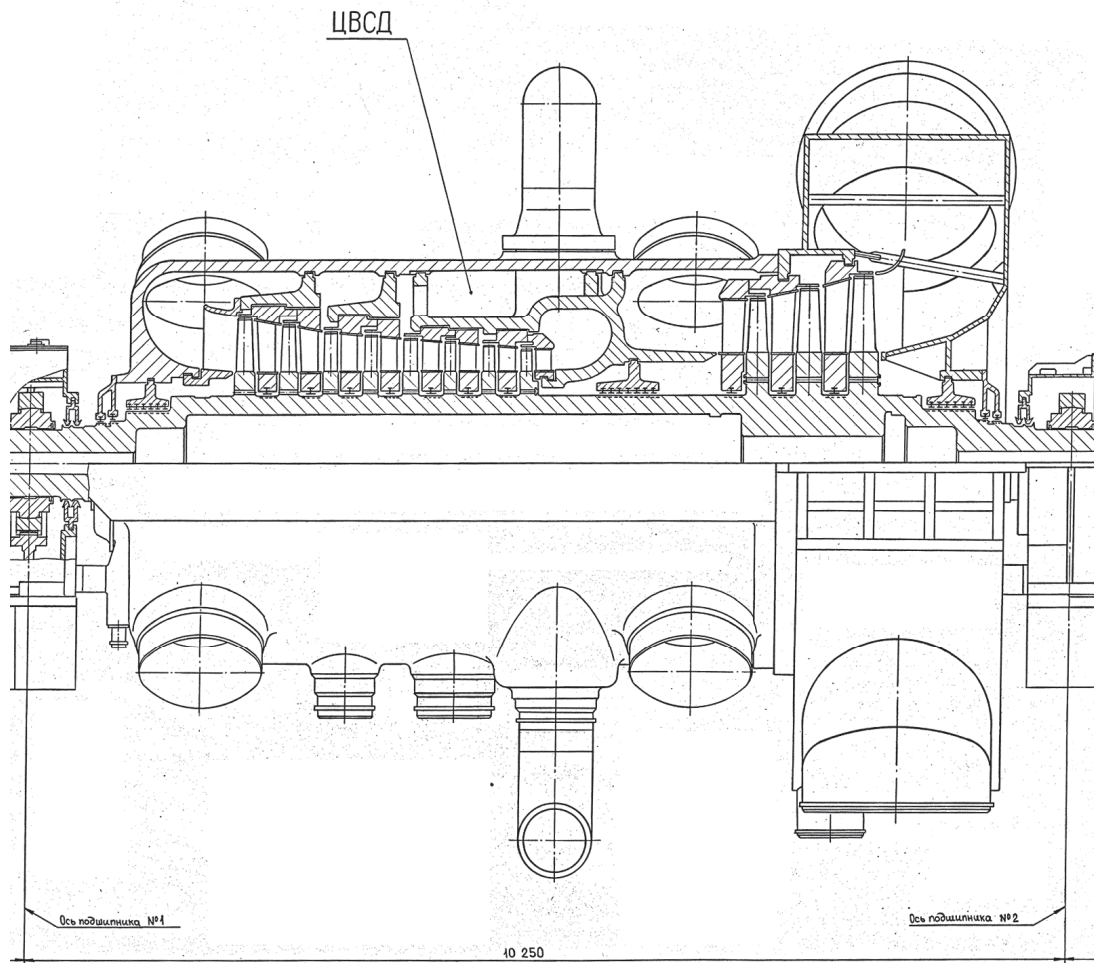


Рис. 2 – Продольный разрез ЦВСД турбины К-1250

Таблица 2.

Основные геометрические характеристики ступеней проточной части ЦСД

№ ст.	$D_{\text{ср.НА}}, \text{мм}$	$l_{\text{НА}}, \text{мм}$	$D_{\text{ср.ПК}}, \text{мм}$	$l_{\text{ПК}}, \text{мм}$	$Z_{\text{НА}}, \text{шт}$	$Z_{\text{ПК}}, \text{шт}$	$\alpha_1, \text{градус}$	$\beta_2, \text{градус}$	$\beta_1, \text{градус}$
1	3277,0	225,0	3283,0	237,0	142	220	14,33	20,70	34,44
2	3370,0	330,0	3423,5	393,5	142	170	14,56	19,00	44,29
3	3535,5	515,5	3589,5	584,5	142	100	13,71	18,82	58,64

Таблица 3.

Основные газодинамические параметры в зазорах между ступенями ЦВД

№ ст.	Полное давление на входе $P_{\text{вх}}, \text{МПа}$	Плотность на входе $\rho, \text{кг/м}^3$	Полная температура на входе $t, \text{°C}$	Статическое давление на выходе $P_{\text{вых}}, \text{МПа}$
1	6,6930	34,746	282,8	5,3754
2	5,3754	27,378	268,5	4,3252
3	4,3252	21,780	255,0	3,4692
4	3,4692	17,369	242,0	2,7740
5	2,7740	13,870	229,5	2,1959
6	2,1959	10,992	217,5	1,7297
7	1,7297	8,715	205,2	1,3556
8	1,3556	6,886	193,5	1,0828

Таблица 4.

Основные газодинамические параметры в зазорах между ступенями ЦСД

№ ст.	Полное давление на входе $P_{вх}$, МПа	Плотность на входе ρ , кг/м ³	Полная температура на входе t , °С	Статическое давление на выходе $P_{вых}$, МПа
1	1,0070	5,179	269,6	0,7070
2	0,7070	3,701	227,7	0,5003
3	0,5003	2,670	189,5	0,3551

Методика выполнения трехмерных расчетов, построения расчетной сетки и выбора характерных сечений для определения интегральных газодинамических характеристик базировалась на следующем:

- расчеты проводились по «отсекам». В качестве отсека выбиралась группа последовательно расположенных ступеней с приблизительно одинаковым массовым расходом пара, т. е. между которыми нет значительных отборов рабочего тела;

- при расчетах не учитывались надбандажные, междисковые и диафрагменные протечки, отборы рабочего тела, а также влияние влажности пара на показатели экономичности проточной части;

- отображение физической области на расчетную выполнялось с помощью расчетной сетки *H*-типа. Размерность сетки в каждом венце составляла 80×80×96 ячеек, т. е. более 1,2 млн. ячеек в одной ступени;

- термодинамические свойства рабочего тела описывались уравнением состояния *IAPWS-95* согласно которым в зоне фазового перехода пар считается в равновесном состоянии;

- при расчетах обмен данными между смежными венцами осуществлялся осредненными в окружном направлении газодинамическими параметрами в областях стыковки расчетных сеток. Расчетные сетки смежных венцов стыковались приблизительно посередине осевых межвенцовых и межступенчатых зазоров;

- осредненные параметры для интегральных характеристик определялись на границах расчетных сеток – вход в венец НА (направляющий аппарат), в осевом зазоре между НА и РК (рабочее колесо), на выходе из РК.

При разработке проточной части сохранялись высоты лопаток РК в соответствии с табл. 2–3, а число лопаток НА и РК определялось из условия максимума КПД и удовлетворения требованиям вибрационной прочности. Осевые размеры из условий максимально возможных габаритов проточных частей для ЦВД не должны превышать 3000 мм (от входной кромки НА первой ступени до выходной кромки РК последней ступени), а для ЦСД – 1650 мм.

Результаты и анализ расчета течения пара в ЦВД паровой турбины К-1250

В результате проведенных исследований разработана трехмерная модель проточной части ЦВД паровой турбины К-1250, вид которой представлен на рис. 3а в табл. 5 – основные геометрические характеристики. Лопатки направляющих аппаратов первых четырех ступеней и рабочие лопатки первых двух ступеней имеют постоянные сечения, остальные лопатки выполнены с переменными по высоте сечениями профилей (рис. 4). Все лопатки разработаны с помощью описанного выше метода профилирования. Для уменьшения отрывов потока периферийные обводы спроектированы плавными, а лопатки НА начиная с 5-й ступени выполнены с увеличивающейся по высоте хордой (см. рис. 3а и рис. 4).

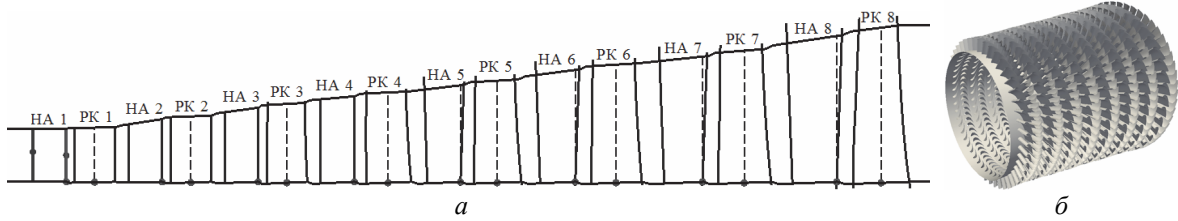


Рис. 3 – Вид проточної частини циліндра високого тиску турбіни К-1250:
а – меридіональна проекція; б – візуалізація трьохмерної моделі

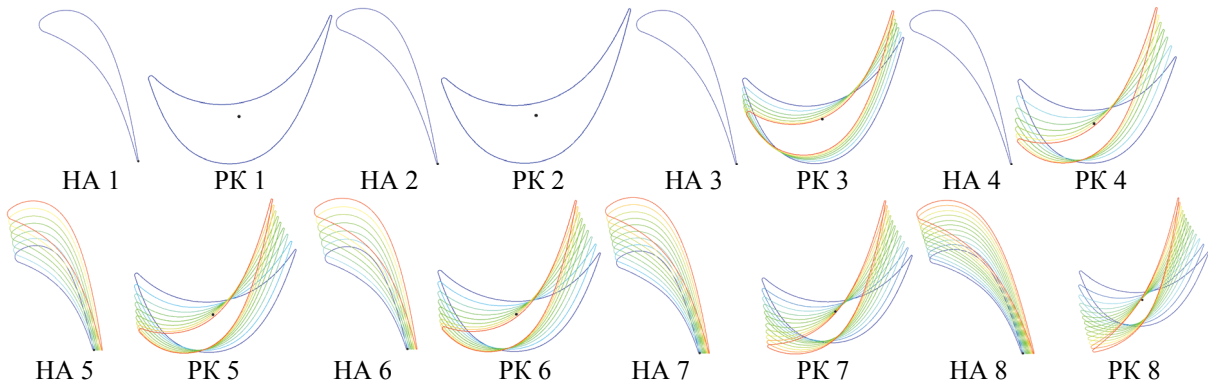


Рис. 4 – Профіли лопаток проточної частини ЦВД парової турбіни К-1250

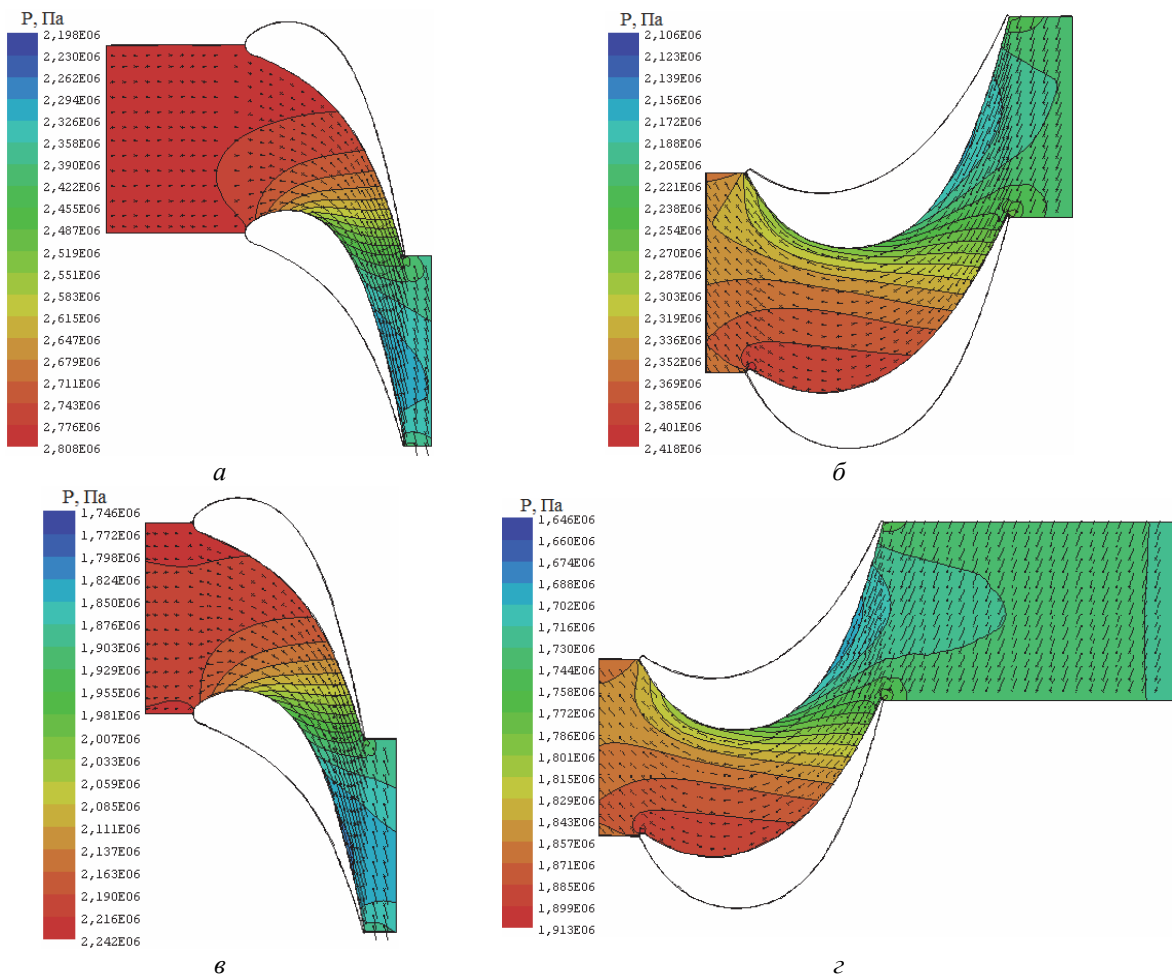


Рис. 5 – Картина обтекання НА і РК в середніх сеченнях ступеней 5, 6 ЦВД турбіни К-1250:
а – НА 5-я ступень; б – РК 5-я ступень; в – НА 6-я ступень; г – РК 6-я ступень

Таблица 5.

Основные геометрические характеристики ступеней проточной части ЦВД

№ ст.	$D_{\text{ср.НА}}$, мм	$l_{\text{НА}}$, мм	$D_{\text{ср.РК}}$, мм	$l_{\text{РК}}$, мм	$Z_{\text{НА}}$, шт	$Z_{\text{РК}}$, шт	α_1 , градус	β_2 , градус	β_1 , градус
1	1951,0	167,0	1951,9	172,8	48	64	12,43	20,07	60,93
2	1963,3	183,6	1987,4	211,8	48	64	12,95	19,88	57,92
3	1999,9	223,2	2020,8	248,4	48	64	13,43	19,68	54,64
4	2039,3	265,5	2057,2	284,3	48	64	14,19	21,18	49,47
5	2070,2	295,8	2093,5	320,5	48	64	13,66	19,74	50,2
6	2116,5	341,8	2143,3	371,5	48	64	14,23	20,2	45,4
7	2159,9	386,2	2185,6	414,1	46	62	15,14	19,97	38,38
8	2215,5	442,4	2255,1	483,6	44	56	17,42	20,44	11,83

В качестве примера на рис. 5 представлена картина визуализации обтекания ступеней № 5 и № 6 ЦВД. В средних сечениях наблюдается благоприятная картина течения. Благодаря использованию гладких профилей графики распределения статического давления на поверхностях лопаток монотонные (рис. 6).

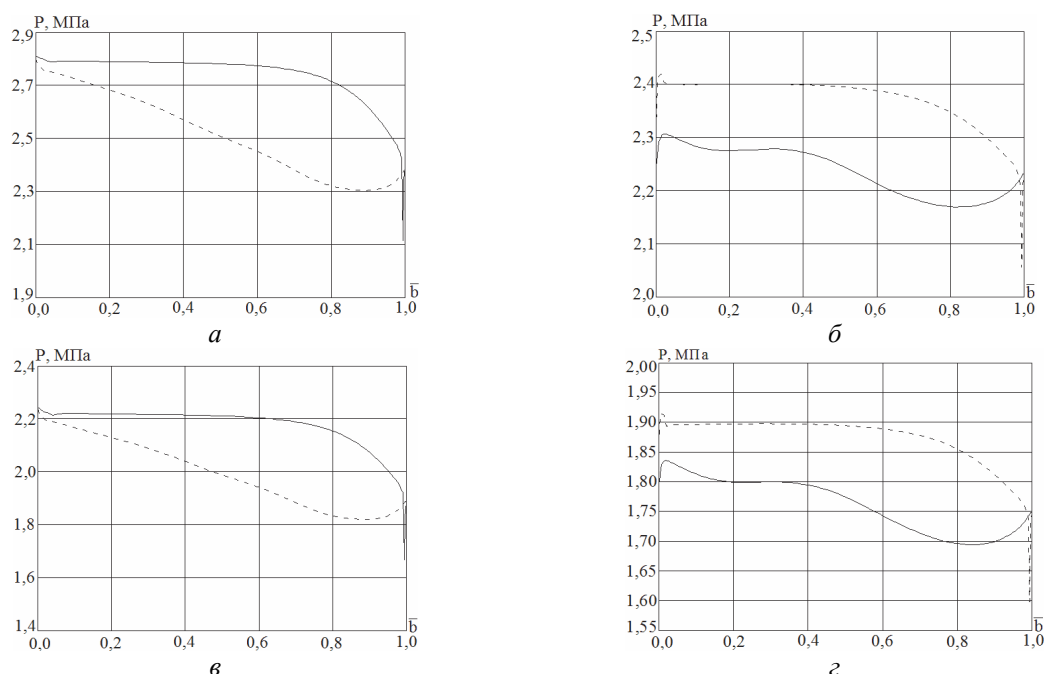


Рис. 6 – Распределение давления вдоль поверхности профиля НА и РК ступеней ЦВД паровой турбины К-1250: а – НА 5-я ступень; б – РК 5-я ступень; в – НА 6-я ступень; г – РК 6-я ступень

В остальных ступенях также наблюдается благоприятная картина течения, за счет чего обеспечивается высокий уровень газодинамической эффективности ЦВД в целом (табл. 6).

Таблица 6.

КПД ступеней ЦВД паровой турбины К-1250

Параметр	Номер ступени							
	1	2	3	4	5	6	7	8
КПД без учета отборов пара, %	95,82	96,35	96,49	96,91	96,61	96,93	96,86	97,08

Из представленных в табл. 6 результатов видно, что все ступени конструкции ЦВД имеют высокое значение КПД. Коэффициент полезного действия разработанной

проточной части ЦВД без учетов отборов пара составил 96,6 %, а с учетом отборов – 96,0 %.

Результаты и анализ расчета течения пара в ЦСД паровой турбины К-1250

Подобно ЦВД разработана трехмерная модель ЦСД, вид которой представлен на рис. 7а в табл. 7 приведены ее основные геометрические характеристики. Лопатки направляющих аппаратов и рабочих колес выполнены с переменными по высоте профилями (рис. 8). Для уменьшения отрывов потока периферийные обводы спроектированы плавными, а лопатки НА выполнены с увеличивающейся по высоте хордой (см. рис. 7а и рис. 8).

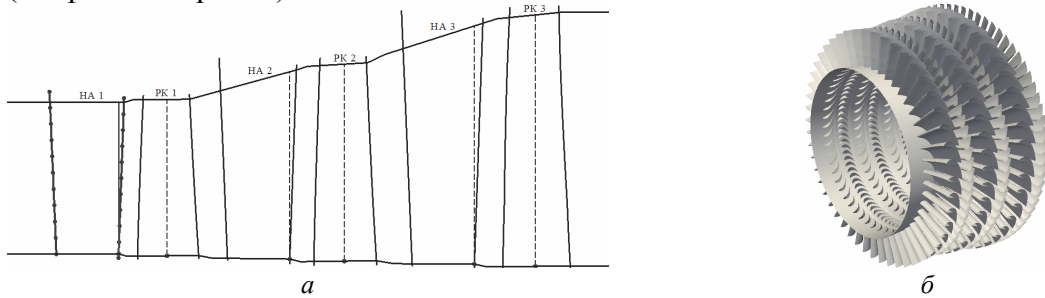


Рис. 7 – Вид проточной части цилиндра среднего давления турбины К-1250:
а – меридиональная проекция; б – визуализация трёхмерной модели

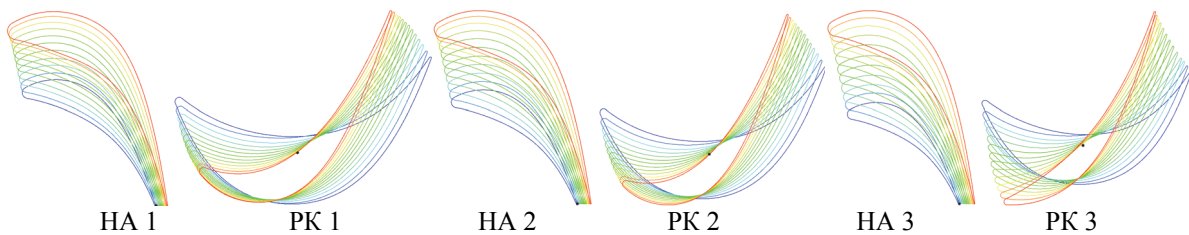


Рис. 8 – Профили лопаток проточной части ЦСД паровой турбины К-1250

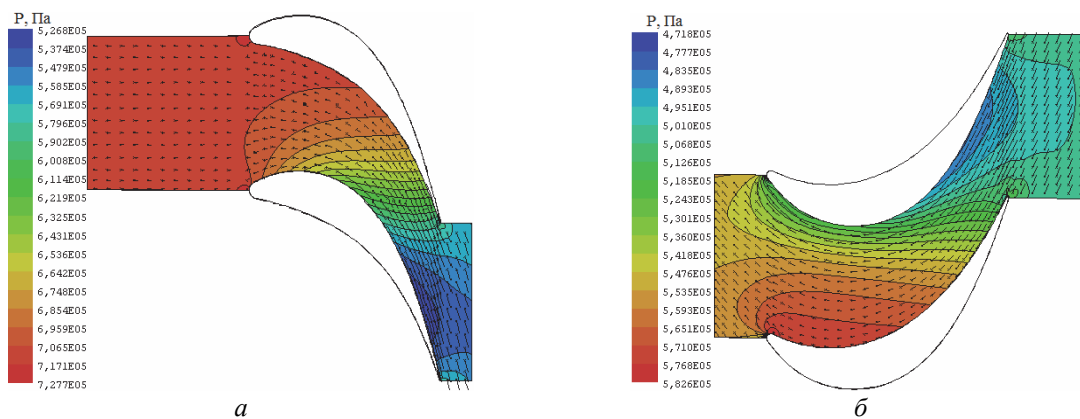


Рис. 9 – Картина обтекания НА и РК в средних сечениях 2-ой ступени ЦСД турбины К-1250:
а – НА 2-я ступень; б – РК 2-я ступень

Таблица 7.

Основные геометрические характеристики ступеней проточной части ЦСД

№ ст.	$D_{\text{ср НА}}$, мм	$l_{\text{НА}}$, мм	$D_{\text{ср РК}}$, мм	$l_{\text{РК}}$, мм	$Z_{\text{НА}}$, шт	$Z_{\text{РК}}$, шт	α_1 , градус	β_2 , градус	β_1 , градус
1	2576,0	436,0	2577,1	450,1	50	78	17,7	24,04	52,52
2	2596,5	482,4	2659,7	564,0	50	78	17,27	22,66	46,89
3	2701,9	619,4	2783,2	717,5	50	78	18,0	23,22	36,12

На рис. 9 представлена визуализация течения, а на рис. 10 распределение статического давления на поверхностях лопаток 2-ой ступени. По представленным результатам можно сделать выводы о благоприятной картине течения в ЦСД.

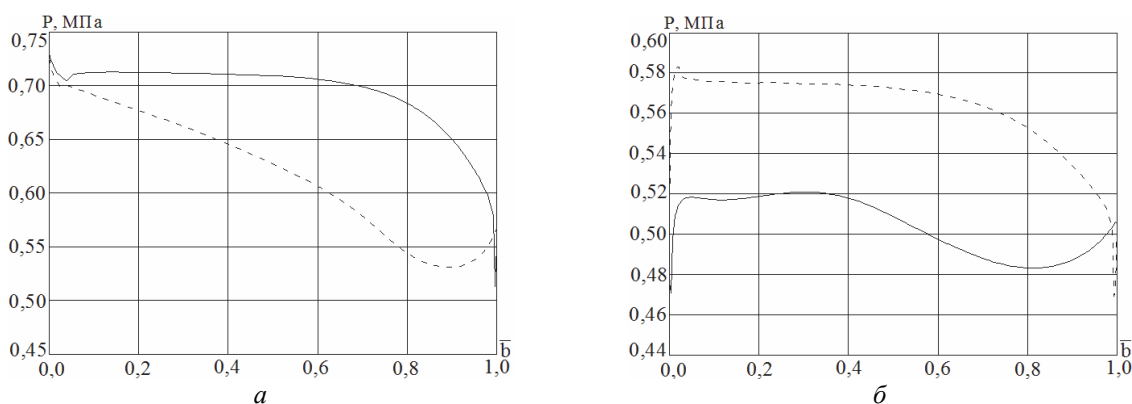


Рис. 10 – Распределение давления вдоль поверхности профиля НА и РК 2-ой ступени ЦСД паровой турбины К-1250:
a – НА 2-я ступень; *б* – РК 2-я ступень

Разработанная проточная часть ЦСД имеет высокий уровень газодинамической эффективности (табл. 8).

Суммарный коэффициент полезного действия разработанной проточной части ЦСД без учета отборов пара составил 96,4 %, а с учетом отборов – 94,3 %.

Таблица 8.

КПД ступеней ЦСД паровой турбины К-1250

Параметр	Номер ступени		
	1	2	3
КПД без учета отборов пара, %	96,37	96,2	96,72

Выводы

На основе использования современных методов расчета трехмерных вязких течений, параметризации, аналитического профилирования лопаток и меридиональных обводов разработана проточная часть ЦВСД новой паровой турбины К-1250. Предложенная проточная часть имеет высокий уровень газодинамического совершенства и обеспечивает КПД ЦВД и ЦСД без учета отборов пара 96,6 и 96,4 % соответственно. С учетом отборов пара КПД ЦВД составляет 96,0 %, а ЦСД – 94,3 %.

Список литературы: 1. Турбоатом. Материал из Википедии — свободной энциклопедии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D2%F3%F0%E1%EE%E0%F2%EE%EC>. – Загл. с экрана. – 01.12.2014. 2. ANSYS, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com/>. – Загл. с экрана. – 02.12.2014. 3. А. с. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовісцевих турбомашинах «FlowER» [Текст] / С. В. Єршов, А. В. Русанов. – Державне агентство України з авторських та суміжних прав, ПА № 77; 19.02.96. – 1 с. 4. Русанов, А. В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин [Текст] / А. В. Русанов, С. В. Ершов. – Харьков : ИПМаш НАН Украины, 2008. – 275 с. 5. IAPWS, Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. – Available from: <http://www.iapws.org>. 6. Русанов, А. В. Моделирование 3D течений в проточной части ЦВД паровой турбины с использованием системы уравнений термодинамических свойств воды и водяного пара IAPWS-95 [Текст] / А. В. Русанов, П. Лампарт, Н. В. Пашенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 7(94). – С. 107–113. – ISSN 1727-7337.

7. Lampart, P. Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases [Text] / P. Lampart, S. Yershov, A. Rusanov // International conference SYMKOM'02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery, Politechnika Lodzka, Lodz, Poland. – 2002. – No. 122. – P. 63–70. 8. Хомылев, С. А. Численное исследование обтекания турбинных решеток профилей: часть 1 – верификация расчетного метода [Текст] / С. А. Хомылев, С. Б. Резник, С. В. Ершов // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. трудов. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – № 6. – С. 23–31. 9. Русанов, А. В. Метод аналитического профилирования лопаточных венцов проточных частей осевых турбин [Текст] / А. В. Русанов, Н. В. Пащенко, А. И. Косьянова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 2/7(38). – С. 32–37. – ISSN 1729-3774. 10. Бойко, А. В. Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбомашин [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорухенко. – Харьков : Вища школа, 1989. – 217 с. 11. Разработка проточной части ЦСД паровой турбины Т-125/150-12,8 на основе использования современных компьютерных технологий [Текст] / А. В. Русанов, А. Л. Шубенко, А. Ю. Култышев, В. Н. Билан, М. Ю. Степанов, А. В. Сенцкий, Н. В. Пащенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 11(1054). – С. 16–29. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X.

Bibliography (transliterated): 1. "Turboatom." *Material iz Vikipedii — svobodnoj jenciklopedii*. Wikimedia Foundation, Inc. Web. 01 December 2014 <<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D2%F3%F0%E1%EE%E0%F2%EE%EC>>. 2. "ANSYS." *ANSYS, Inc.* Web. 02 December 2014 <<http://www.ansys.com/>>. 3. Ershov, S. V., and A. V. Rusanov. "Kompleks program rozrahunku trivimirnih techij gazu v bagatovincevih turbomashinah "FlowER"." [Patent] *A.s. Derzhavne agentstvo Ukraini z avtors'kih ta sumizhnih prav*. PA No 77. 19 February 96. Print. 4. Rusanov, A. V., and S. V. Ershov. *Matematicheskoe modelirovanie nestacionarnyh gazodinamicheskikh processov v protochnyh chastjah turbomashin*. Kharkov : IPMash NAN Ukrainy, 2008. Print. 5. Harvey, A., A. Anderko, M. Rziha and others. "The International Association for the Properties of Water and Steam". *IAPWS, Inc.* IAPWS. Web. 20 December 2014 <<http://www.iapws.org/>>. 6. Rusanov, A. V., P. Lampart and N. V. Pashhenko. "Modelirovanie 3D techenij v protochnoj chasti CND parovoj turbiny s ispol'zovaniem sistemy uravnenij termodinamicheskikh svojstv vody i vodjanogo para IAPWS-95." *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. No 7(94). 2012. 107–113. ISSN 1727-7337. Print. 7. Lampart, P., S. Yershov and A. Rusanov. "Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases." *International conference SYMKOM'02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery, Politechnika Lodzka, Lodz, Poland*. No 122. 2002. 63–70. Print. 8. Homylev, S. A., S. B. Reznik and S. V. Ershov. "Chislennoe issledovanie obtekanija turbinnih reshetok profilej: chast' 1 – verifikacija raschetnogo metoda." *Jenergeticheskie i teplotehnicheckie processy i oborudovanie. Vestnik NTU "KhPI" : sb. nauch. trudov*. No 6. Kharkiv : NTU "KhPI", 2008. 23–31. Print. 9. Rusanov, A. V., N. V. Pashhenko and A. I. Kos'janova. "Metod analiticheskogo profilirovanija lopatochnyh vencov protochnyh chastej osevyh turbin." *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij* 2/7(38) (2009): 32–37. ISSN 1729-3774. Print. 10. Boiko, A. V., and Yu. N. Govorushhenko. *Osnovy teorii optimal'nogo proektirovanija protochnoj chasti osevyh turbomashin*. Kharkov : Vishha shkola, 1989. Print. 11. Rusanov, A. V., et al. "Razrabotka protochnoj chasti CSD parovoj turbiny T-125/150-12,8 na osnove ispol'zovanija sovremennyh komp'juternyh tehnologij." *Visnik NTU "KhPI". Serija: Energetichni ta teplotehnicchni procesi j ustatkuvannja*. No 11(1054). Kharkov : NTU "KhPI", 2014. 16–29. ISSN 2078-774X. Print.

Поступила (received) 06.01.2015