

УДК 621.165:532.6

А.В. РУСАНОВ, Н.В. ПАЩЕНКО*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина***ПОВЫШЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦИЛИНДРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ
ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ МОЩНОСТЬЮ 200 МВт**

По результатам численного исследования и анализа структуры трехмерного вязкого течения в ЦНД паровой турбины мощностью 200 МВт, выполненных с использованием программного комплекса FlowER, предложен вариант аэродинамически усовершенствованной проточной части. Первые две ступени модернизированной конструкции срабатывают увеличенный тепловой перепад (по сравнению с существующими прототипами), что обеспечивает разгрузку последней ступени. Разработана последняя ступень, обеспечивающая безотрывное течение во всем диапазоне режимов работы ЦНД. Мощность модернизированной проточной части увеличена на 1,2 – 3 МВт (в зависимости от режима работы турбины).

Ключевые слова: турбина, проточная часть, цилиндр низкого давления, модернизация, аэродинамическое совершенствование, трехмерное вязкое течение

Введение

Цилиндры низкого давления (ЦНД) эксплуатирующихся в Украине паровых турбин мощностью 200 МВт имеют четыре ступени, причем наиболее устаревшие из них выполнены с последней ступенью Баумана. Существует несколько вариантов проектов ЦНД с тремя ступенями [1, 2], в которых на последней ступени срабатывается увеличенный тепловой перепад (по сравнению с четырехступенчатой конструкцией), что приводит к снижению эффективности работы турбины при низких значениях давления в конденсаторе (от 5 кПа и ниже).

В статье представлены результаты исследований по модернизации ЦНД паровой турбины мощностью 200 МВт, выполненных с использованием современных методов вычислительной гидрогазодинамики. Целью работы являлось создание проточной части трехступенчатого ЦНД паровой турбины с увеличенным тепловым перепадом на первых двух ступенях (по сравнению с прототипом), за счет чего обеспечивается разгрузка последней ступени и повышается ее аэродинамическая эффективность. Геометрическая форма модернизированной проточной части разработана с помощью метода, в котором профили лопаток направляющих аппаратов (НА) и рабочих колес (РК) описываются кривыми четвертого порядка [3].

1. Метод расчета течения

Расчеты трехмерных вязких течений выполнены с использованием программного комплекса

FlowER [4, 5], который обладает необходимой достоверностью получаемых результатов, как по качественной структуре течения, так и по количественной оценке аэродинамических характеристик проточных частей турбомашин [6, 7].

2. Условия и методика проведения исследования

В исследуемом ЦНД первая и вторая ступени работают в области перегретого пара, а последняя ступень – влажного пара. В расчетах использовалось уравнение состояния Таммана, которое не моделирует фазовый переход рабочего тела, поэтому все приведенные результаты численного эксперимента получены без учета потерь от влажности.

Проточная часть разделена на две расчетные области: расчетная область № 1 – первая и вторая ступени, расчетная область № 2 – третья ступень. При таком способе расчетов необходимо согласовать массовый расход, температуру и другие газодинамические параметры на границе между расчетными областями (между второй и третьей ступенями).

Последняя ступень во всем диапазоне режимов работы (режимы: № 1 – $P_{\text{вых}}=12,3$ кПа, № 2 – $P_{\text{вых}}=8$ кПа, № 3 – $P_{\text{вых}}=5$ кПа, № 4 – $P_{\text{вых}}=3,5$ кПа) находится в режиме «запирания», из-за чего параметры потока перед ней практически не зависят от величины вакуума в конденсаторе. Это делает возможным, при постоянных граничных условиях на входе в ЦНД, проводить только один расчет для первой и второй ступеней.

3. Исходная проточная часть ЦНД

Рассмотрена трехступенчатая модификация ЦНД паровой турбины мощностью 200 МВт, предложенная в работах [1, 2]. На рис. 1 представлен вид исходной конструкции, а в табл. 1 – основные геометрические характеристики.

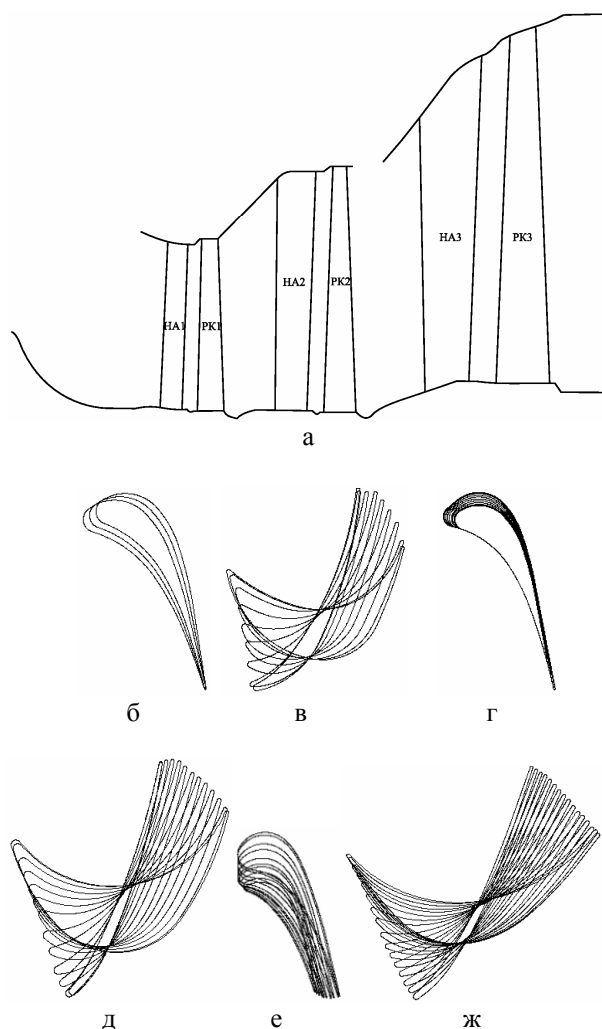


Рис. 1. Исходная проточная часть ЦНД (трехступенчатая модификация):

- а – меридиональное сечение;
- б – НА первой ступени; в – РК первой ступени;
- г – НА второй ступени; д – РК второй ступени;
- е – НА третьей ступени; ж – РК третьей ступени

Численное исследование исходной конструкции ЦНД, результаты которого представлены в работах [8, 9], показало что углы выхода потока из 1-й и 2-й ступеней существенно отклонены от осевого направления.

В табл. 2 приведены газодинамические характеристики ступеней исходной проточной части ЦНД. Из представленных на рис. 2 графиков видно, что распределение давлений на стороне разрежения

РК последней ступени не монотонно, а нагруженность лопатки по ширине существенно неравномерна.

Степень реактивности в прикорневой зоне второй ступени и на большинстве режимов работы третьей ступени имеет отрицательное значение (рис. 3), что приводит к возникновению отрывов и значительным радиальным перетеканиям потока по спинке лопаток рабочих колес.

Перечисленные негативные явления уменьшают аэродинамическую эффективность проточной части.

Таблица 1
Геометрические характеристики исходной конструкции ЦНД паровой турбины

Параметр	1-я ступень		2-я ступень		3-я ступень	
	НА	РК	НА	РК	НА	РК
l/b *	3,95	5,54	3,58	7,7	3,42	6,95
t/b *	0,77	0,65	0,75	0,72	0,77	0,59
D/l	4,73	4,65	3,59	3,55	3,1	2,95
Z, шт	76	124	54	120	42	94
$\alpha_{1эф}, \beta_{2эф}$, градус *	11,16	14,83	12,07	17,66	14,8	31,61

* на среднем диаметре

Таблица 2
Газодинамические характеристики ступеней исходной конструкции ЦНД паровой турбины

Параметр	Режим			
	1	2	3	4
$P_{вход}$, кПа	117			
Расход, кг/с	56,9			
1-я ступень				
Реактивность	0,355			
Потери кинетической энергии, %	10,4			
Мощность, МВт	6,57			
2-я ступень				
Реактивность	0,379			
Потери кинетической энергии, %	9,7			
Мощность, МВт	7,26			
3-я ступень				
Расход, кг/с	54,39	54,45	54,4	53,49
Потери кинетической энергии, %	9,79	10,22	11,99	10,57
Потери кинетической энергии с учетом потерь с выходной скоростью, %	25,05	20,15	26,17	42,68
Реактивность	0,268	0,338	0,437	0,562
Мощность, МВт	5,61	8,82	10,63	10,81
ЦНД				
Мощность, МВт	19,44	22,64	24,46	24,64

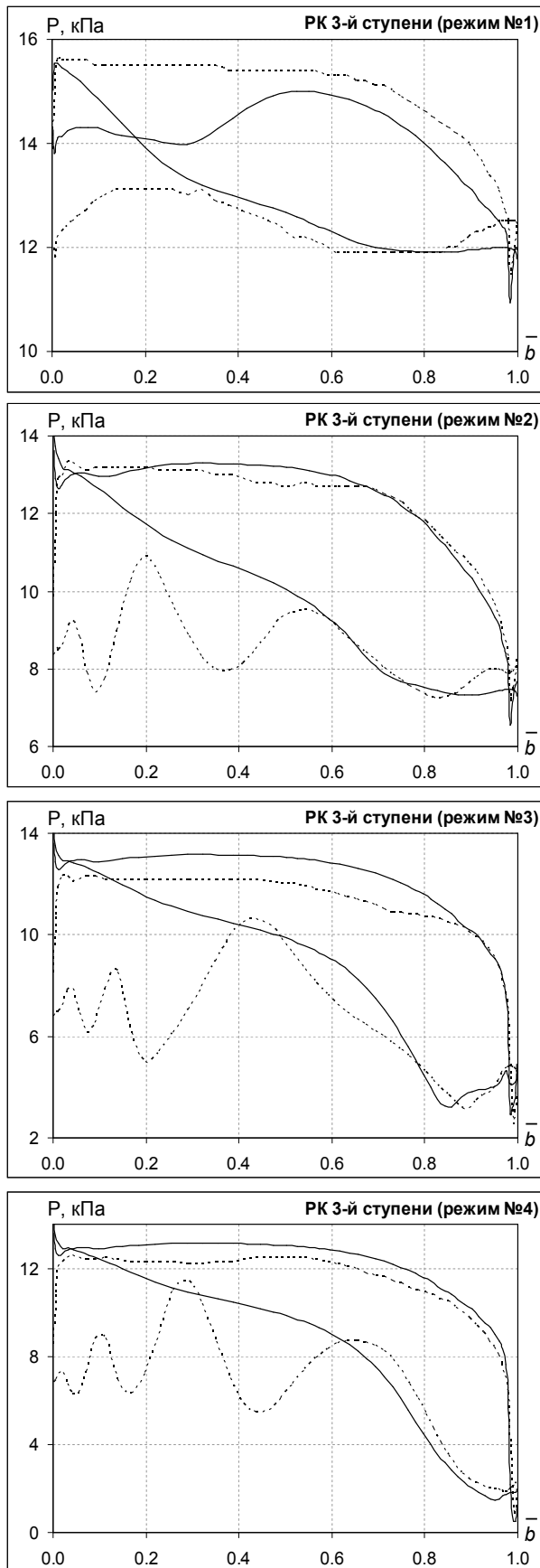


Рис. 2. Распределение давления в среднем сечении на поверхности лопатки по ширине: --- исходная конструкция; — модернизация 2

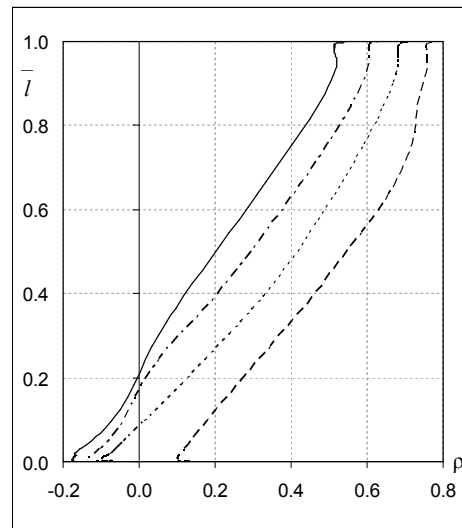


Рис. 3. Распределение степени реактивности по высоте лопатки в 3-й ступени исходного ЦНД: — режим № 1; --- режим № 2; - - - режим № 3; . . . режим № 4

4. Модернизация проточной части

Лопаточные аппараты модернизированных ступеней спроектированы с помощью метода, в котором профили описываются кривыми четвертого порядка [3], и имеют большие значения среднего диаметра D/l (по сравнению с исходной конструкцией ЦНД) [8, 9], что обеспечивает разгрузку последней ступени и приводит к повышению аэродинамической эффективности проточной части.

В работе [8] представлен один из вариантов модернизации проточной части ЦНД (модернизация 1, рис. 4), который по аэродинамическим характеристикам значительно превосходит исходную конструкцию.

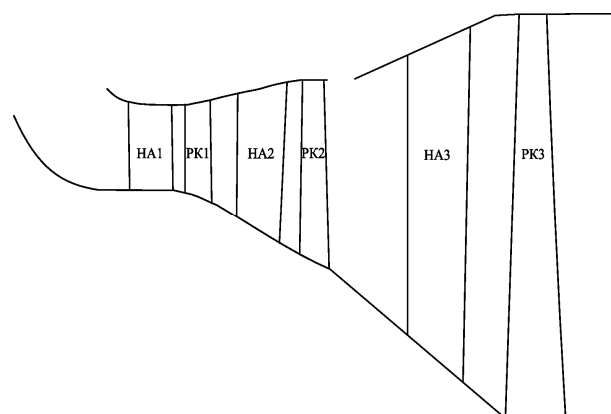


Рис. 4. Проточная часть ЦНД. Модернизация 1

За счет более рационального распределения тепловых перепадов между ступенями и использования современных методов профилирования лопаток

в ЦНД модернизации 1 устранено большинство негативных газодинамических эффектов, которые имели место в исходной проточной части. Однако в результате детального исследования структуры течения был обнаружен отрыв в прикорневой области рабочей лопатки последней ступени, который усиливается при повышении давления в конденсаторе. Отрыв потока образуется за счет отрицательной реактивности у корня (рис. 5), а также большой диффузорности канала и резкого раскрытия корневого обвода проточной части перед рабочим колесом последней ступени.

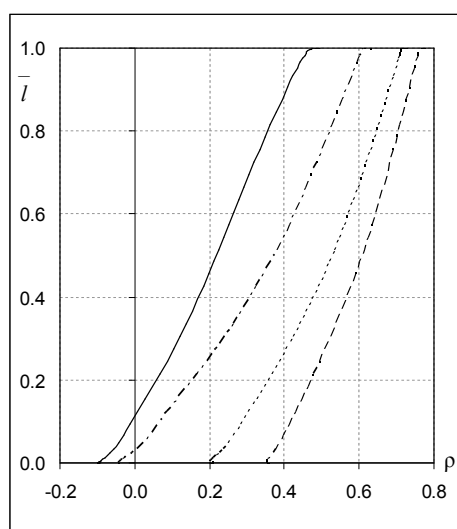


Рис. 5. Распределение степени реактивности по высоте лопатки в 3-й ступени ЦНД модернизации 1: — режим № 1; --- режим № 2; - - - режим № 3; - - - режим № 4

Чтобы определить возможность устранения отрыва в РК последней ступени модернизации 1 за счет пространственного профилирования было рассмотрено несколько вариантов НА с лопатками саблевидной и стреловидной формы, использование которых позволило увеличить реактивность у корня, но не привело к полному исчезновению отрыва потока.

Следующим этапом исследования была разработка проточной части ЦНД с более короткой рабочей лопаткой последней ступени и меньшим углом раскрытия корневого обвода. Вид проточной части ЦНД модернизации 2 изображен на рис. 6, основные геометрические характеристики приведены в табл. 3, а газодинамические характеристики ЦНД — в табл. 4.

В конструкции ЦНД модернизации 2, как видно из рис. 2, распределение давлений на поверхностях рабочих лопаток последней ступени стало более монотонным. За счет увеличения корневого диаметра и изменения отношения D/l в последней

ступени модернизации 2 получена положительная реактивность по всей высоте канала во всем диапазоне режимов работы ЦНД (рис. 7), что привело к устранению отрыва, имеющего место в конструкции модернизации 1.

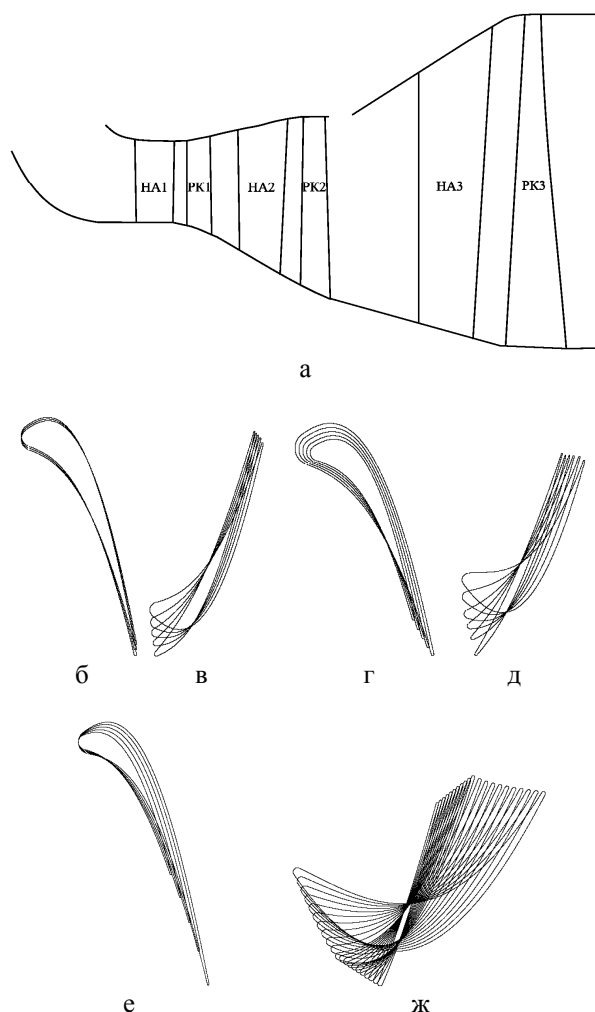


Рис. 6. Проточная часть ЦНД. Модернизация 2: а — меридиональное сечение; б — НА первой ступени; в — РК первой ступени; г — НА второй ступени; д — РК второй ступени; е — НА третьей ступени; ж — РК третьей ступени

Таблица 3

Геометрические характеристики конструкций ЦНД модернизации 2

Параметр	1-я ступень		2-я ступень		3-я ступень	
	НА	РК	НА	РК	НА	РК
l/b *	0,95	1,73	2,13	3,73	2,53	5,94
t/b *	0,78	0,69	0,75	0,54	0,69	0,6
D/l	13,17	11,78	6,03	6,0	3,67	3,46
Z, шт	50	92	54	130	42	108
$\alpha_{1эф}, \beta_{2эф},$ градус *	13,41	15,18	14,93	16,67	15,24	19,47

* на среднем диаметре

Таблица 4

Газодинамические характеристики ступеней исходной конструкции ЦНД паровой турбины

Параметр	Режим			
	1	2	3	4
$P_{\text{вход}}, \text{кПа}$	117			
Расход, кг/с	56,8			
1-я ступень				
Реактивность	0,518			
Потери кинетической энергии, %	6,2			
Мощность, МВт	9,08			
2-я ступень				
Реактивность	0,542			
Потери кинетической энергии, %	8,0			
Мощность, МВт	8,18			
3-я ступень				
Расход, кг/с	53,35	54,62	54,72	54,5
Потери кинетической энергии, %	12,66	6,34	8,03	10,77
Потери кинетической энергии с учетом потерь с выходной скоростью, %	23,78	8,92	12,25	18,72
Реактивность	0,288	0,458	0,608	0,676
Мощность, МВт	3,45	7,31	9,67	10,39
ЦНД				
Мощность, МВт	20,71	24,57	26,93	27,65

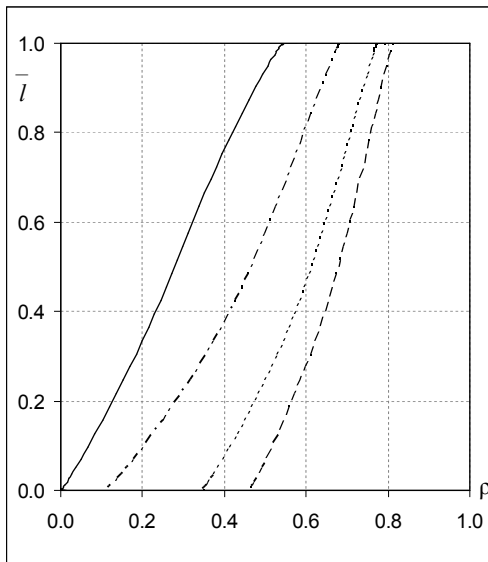


Рис. 7. Распределение степени реактивности по высоте лопатки в 3-й ступени ЦНД модернизации 2:
 — режим № 1; ···· режим № 2;
 --- режим № 3; -·-· режим № 4

На рис. 8 и в табл. 2, 4 представлены суммарные мощностные характеристики исходного и модернизированного ЦНД (модернизация 2). Видно,

что модернизированный ЦНД превосходит исходный во всем диапазоне режимов работы по мощности — на 1,2–3 МВт.

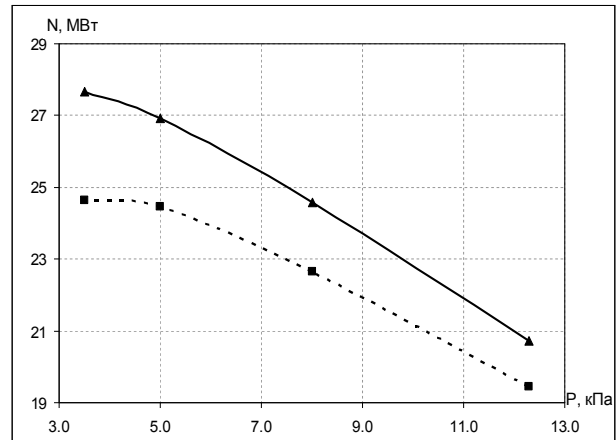


Рис. 8. Зависимость мощности ЦНД от давления в конденсаторе:
 ---- исходная конструкция; — модернизация 2

Заключение

Выполнено аэродинамическое совершенствование проточной части трехступенчатого ЦНД паровой турбины мощностью 200 МВт. Первые две ступени модернизированного ЦНД срабатывают увеличенный тепловой перепад, за счет чего обеспечивается разгрузка последней ступени и реализуется безотрывное обтекание лопаточных аппаратов проточной части во всем диапазоне режимов работы ЦНД. Мощность модернизированной проточной части увеличена на 1,2–3 МВт (в зависимости от режима работы турбины).

Литература

1. Мамонтов Н.И. Некоторые проблемы реконструкции и модернизации паровых турбин тепловых электростанций Украины / Н.И. Мамонтов, Т.Н. Пугачева // Энерг. и теплотехн. процессы и оборудование. — 2008. — № 6. — С. 152-161.
2. Тарелин А.А. Основы теории и методы создания оптимальной последней ступени паровых турбин / А.А. Тарелин, Ю.П. Антипцев, И.Е. Аннопольская. — Х.: Контраст, 2001. — 224 с.
3. Русанов А.В. Метод аналитического профилирования лопаточных венцов проточных частей осевых турбин / А.В. Русанов, Н.В. Пащенко, А.И. Косьянова // Восточ.-Европ. журн. передовых технологий. — 2009. — № 2. — С. 32-37.
4. А.с. № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовіцевих турбомашинах "FlowER" / С.В. Єршов, А.В. Русанов. — 1996.

5. Бойко А.В. Аэродинамический расчет и оптимальной проектирование проточной части турбомашин / А.В. Бойко, Ю.Н. Говоруценко, С.В. Еришов, А.В. Русанов, С.Д. Северин. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.

6. Lampart P. Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases / P. Lampart, S. Yershov, A. Rusanov // Intern. Conf. SYMKOM'02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery, Politechnika Łódzka, Łódź, Poland. – 2002. – No. 122. – P. 63-70.

7. Хомылев С.А. Численное исследование обтекания турбинных решеток профилей: Ч. 1. Верифи-

кация расчетного метода / С.А. Хомылев, С.Б. Резник, С.В. Еришов // Энерг. и теплотехн. процессы и оборудование. – 2008. – № 6. – С. 23-31.

8. Русанов А.В. Аэродинамическое совершенствование цилиндра низкого давления паровой турбины мощностью 200 МВт / А.В. Русанов, Н.В. Пащенко // Пробл. машиностроения. – 2009. – № 3. – С. 7-15.

9. Русанов А.В. Аэродинамическое усовершенствование первых двух ступеней ЦНД паровой турбины мощностью 200 МВт / А.В. Русанов, Н.В. Пащенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 7 (54). – С. 78-82.

Поступила в редакцию 29.05.2009

Рецензент: член-корреспондент НАН Украины А.Л. Шубенко, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

ПІДВИЩЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ЦИЛІНДРУ НИЗЬКОГО ТИСКУ ПАРОВОЇ ТУРБІНИ ПОТУЖНІСТЮ 200 МВТ

А.В. Русанов, Н.В. Пащенко

За результатами чисельного дослідження й аналізу структури тривимірної в'язкої течії в ЦНТ парової турбіни потужністю 200 МВт, виконаних за допомогою програмного комплексу *FlowER*, запропоновано варіант аеродинамічно удосконаленої проточної частини. Перші два ступеня модернізованої конструкції спрацьовують збільшений тепловий перепад (в порівнянні з існуючими прототипами), що забезпечує розвантаження останнього ступеня. Розроблено останній ступень, що забезпечує безвідривну течію у всьому діапазоні режимів роботи ЦНТ. Потужність модернізованої проточної частини підвищена на 1,2 – 3 МВт (у залежності від режиму роботи турбіни).

Ключові слова: турбіна, проточна частина, циліндр низького тиску, модернізація, аеродинамічне удосконалення, тривимірна в'язка течія

INCREASE OF AERODYNAMIC EFFICIENCY OF THE LOW-PRESSURE CYLINDER OF STEAM TURBINE POWER 200 MW

A. V. Rusanov, N. V. Paschenko

Numerical analysis of three-dimensional viscous flow of the low-pressure cylinder of 200 MW steam turbine are presented. The improvement of steam turbine is suggested on the basis of the calculations using software *FlowER*. The modernized construction of the first two stage work the increase the temperature difference (in comparison with existing prototypes). The last stage, which provides non-separated flow in all range working regime of the low-pressure cylinder is developed. The modernized construction of the low-pressure cylinder give the increase both of capacity on 1,2 – 3 MW.

Key words: turbine, flowpart, low-pressure cylinder, modernization, aerodynamic improvement, three-dimensional viscous flow

Русанов Андрей Викторович – д-р техн. наук, зам. директора по научной работе ИПМаш НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua

Пащенко Наталья Викторовна – аспирантка ИПМаш НАН Украины, Харьков, Украина.