

УДК 621.165

А. В. РУСАНОВ, А. И. КОСЬЯНОВА, Д. Ю. КОСЬЯНОВ

*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков***ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В РЕГУЛИРУЮЩЕМ ОТСЕКЕ ЦВД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-325-23,5 НА РЕЖИМЕ ПАРЦИАЛЬНОСТИ 0,4**

Представлены результаты численного исследования пространственного вязкого турбулентного течения пара в отсеке проточной части цилиндра высокого давления паровой турбины К-325-23,5, состоящем из регулирующей ступени и уравнительной камеры, на режиме парциальности 0,4. Показано неравномерное распределение нагрузки в рабочем колесе регулирующей ступени. Выполнена оценка неравномерности полных давления и температуры в абсолютном движении в различных сечениях уравнительной камеры. При прохождении камеры коэффициент неравномерности полного давления в абсолютном движении уменьшается более чем в 2 раза, а полной температуры – почти в 6 раз.

Ключевые слова: проточная часть, трёхмерное вязкое течение, регулирующая ступень, уравнительная камера.

Введение

По прогнозным данным доля тепловой энергетики Украины в общем объёме производства электроэнергии на период до 2030 года составит около 40 % [1]. Анализ состояния ТЭС показывает, что существует необходимость замены или модернизации большей части энергоблоков. Для этих целей может быть использована разработанная предприятием ВАТ «Турбоатом» паровая турбина К-325-23,5, регулирование мощности которой выполняется с помощью соплового парораспределения. Дальнейшее повышение эффективности этой турбины возможно за счет совершенствования отсека, состоящего из регулирующей ступени и первой ступени давления [2].

При работе регулирующей ступени возникает существенная окружная неравномерность газодинамических параметров пара даже на номинальном режиме [3, 4]. Её распространение вниз по потоку оказывает влияние на эффективность и надежность работы цилиндра высокого давления (ЦВД) в целом [5].

Для определения направлений газодинамического совершенствования отсека регулирующей ступени необходимо изучение пространственной структуры турбулентного потока [5–7], в том числе с использованием методов математического моделирования.

Статья является развитием работы [3], в ней представлены результаты численного исследования трёхмерного течения пара в отсеке регулирующей ступени на частичном режиме работы турбины со степенью парциальности 0,4. Показано, что существует значительная неравномерность нагруженности

рабочего колеса регулирующей ступени, а также выполнена оценка степени неравномерности потока в различных сечениях уравнительной камеры.

1. Объект исследования. Методика проведения численного эксперимента

В качестве объекта исследования рассмотрен отсек ЦВД паровой турбины К-325-23,5, состоящий из регулирующей ступени (НА1, РК1), уравнительной камеры и первой ступени давления (НА2, РК2), описание которых представлено в работе [2] (рис. 1). Основные геометрические характеристики ступеней приведены в табл. 1.

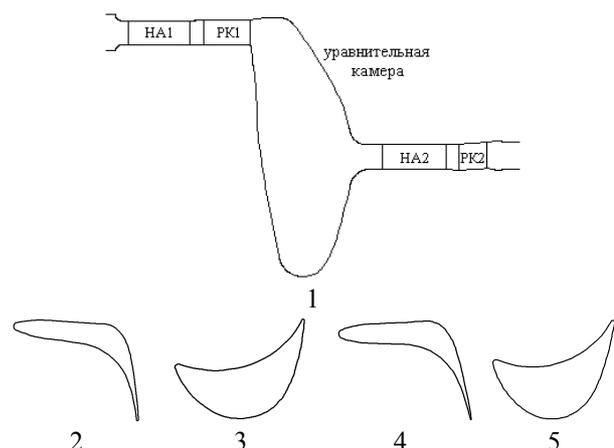


Рис. 1. Исследуемая проточная часть:
1 – меридиональное сечение;
2 – НА1; 3 – РК1; 4 – НА2; 5 – РК2

Для регулирования режима работы турбины К-325-23,5 используется парциальный подвод пара через 4 одинаковые сопловые коробки, расположенные перед первой ступенью ЦВД (рис. 2). На частичном режиме работы пар подаётся через две коробки, что соответствует режиму с парциальностью $\varepsilon = 0,4$. Учитывая периодичность по геометрическим и режимным параметрам в первой ступени, постановка задачи рассмотрена в упрощенной форме. В результате расчётная область составлена из каналов двух сопловых коробок (13 открытых каналов, соответствующих парциальности 0,2, и закрытая часть), а также 36 каналов РК1. Для более корректного моделирования распределения параметров в камере смешения дополнительно учтена вторая ступень (по одному каналу НА2 и РК2). Парциальный подвод пара приводит к неравномерности потока в окружном направлении в первых ступенях ЦВД турбины, а также к большим динамическим нагрузкам. Уравнительная камера предназначена для частичного снижения окружной неравномерности потока перед НА второй ступени.

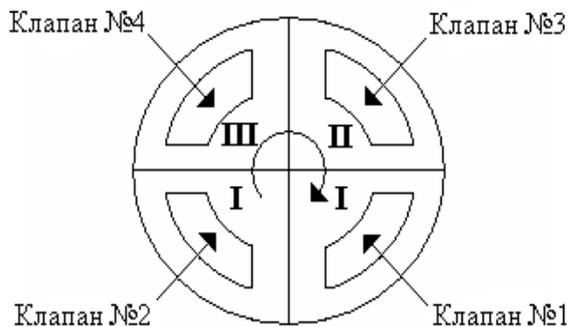


Рис. 2. Схема подвода пара

Численное исследование проведено с помощью математической модели трёхмерного турбулентного течения пара, которая обладает необходимой достоверностью получаемых результатов, как по качественной структуре потока, так и по количественной

оценке аэродинамических характеристик проточных частей турбомашин [8].

Расчёты выполнены с использованием уравнения состояния совершенного газа на сетке с суммарным числом 2,5088 млн ячеек при условиях, соответствующих режиму парциальности $\varepsilon = 0,4$: частота вращения ротора – 3000 об/мин; полная температура на входе – 538,2°C; полное давление на входе – 20,565 МПа; статическое давление на выходе – 10,822 МПа.

При моделировании нестационарного течения пара в первой ступени учитывается взаимное положение НА1 и РК1 в каждый момент времени. Передача параметров пара между первой и второй ступенью происходит в области перед НА2 и основана на процедуре осреднения в окружном направлении, что соответствует квазистационарной постановке задачи для второй ступени.

2. Численные результаты

На рис. 3, 4 и 5 представлены распределения в окружном направлении полных давления P^* и температуры T^* , а также тангенциального угла α в абсолютном движении в сечениях уравнительной камеры, отличающихся удалением от выходной кромки РК1 (в процентах ширины рабочего колеса). Все значения представлены в один и тот же момент времени. Видно, что след от открытой части (активная дуга) наиболее проявляется в диапазоне 0° – 80° сечения уравнительной камеры. По мере продвижения вниз по потоку окружная неравномерность уменьшается.

На рис. 6 приведены распределения полного давления и тангенциального угла в абсолютном движении по длине уравнительной камеры. В отличие от режима работы при парциальности 0,8 [3], среднее значение угла натекания на НА2 не совпадает с углом, формируемым перед входом в уравнительную камеру (рис. 6).

Таблица 1

Геометрические характеристики ступеней ЦВД паровой турбины

Параметр	НА1	РК1	НА2	РК2
l/b (на D_{cp})	0,468 ¹⁾	0,577	0,491 ¹⁾	0,977
D_{cp} , м	1,182	1,183	0,8645	0,8675
t/b (на D_{cp})	0,893 ¹⁾	0,894	0,732 ¹⁾	0,885
D/l	39,4	35,8	27,4	25,9
Z , шт.	52 ²⁾	72	58	90
$\alpha_{1эф}$, $\beta_{2эф}$ (на D_{cp}), градус	9,85	16,97	12,68	19,7

¹⁾ Рассчитано по величине хорды «исходного» профиля ($b=64,1$ мм).

²⁾ Степень парциальности 0,8

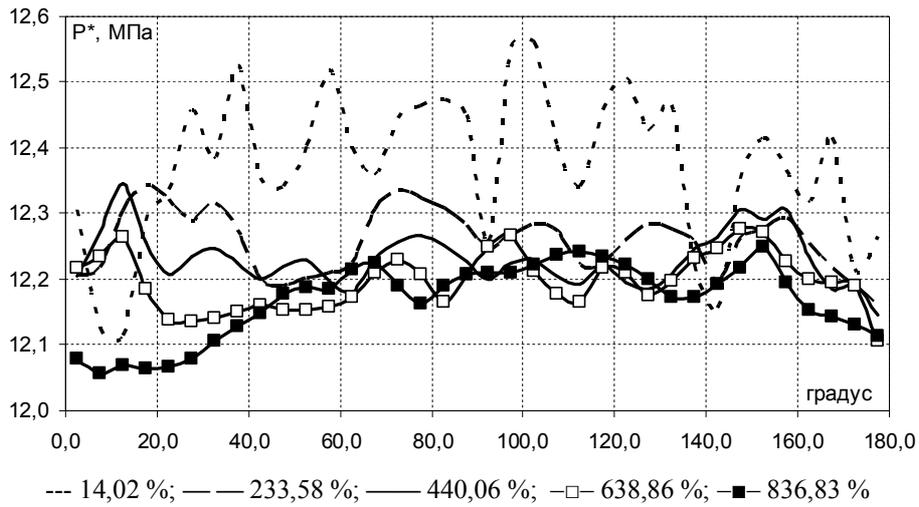


Рис. 3. Распределение P^* в окружном направлении

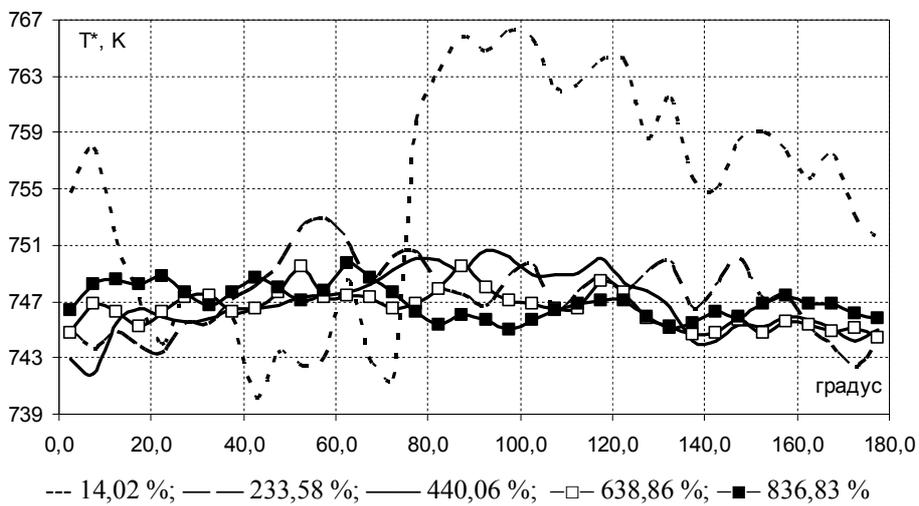


Рис. 4. Распределение T^* в окружном направлении

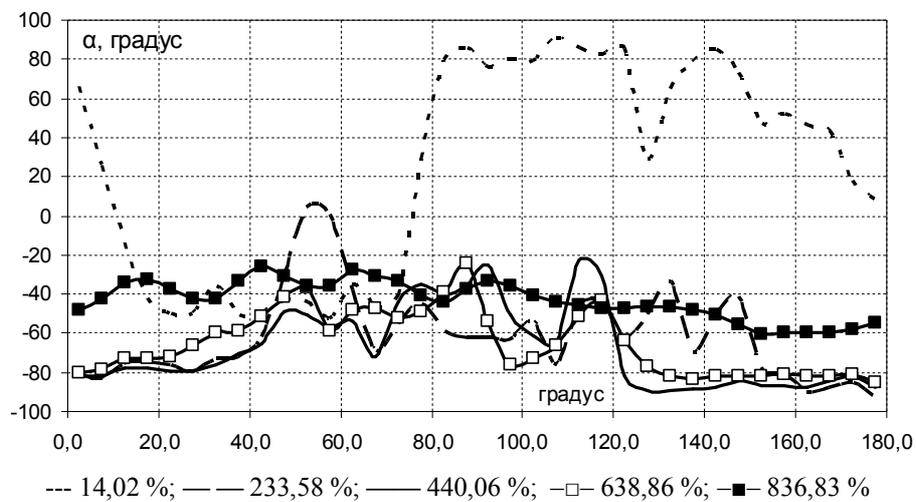


Рис. 5. Распределение α в окружном направлении

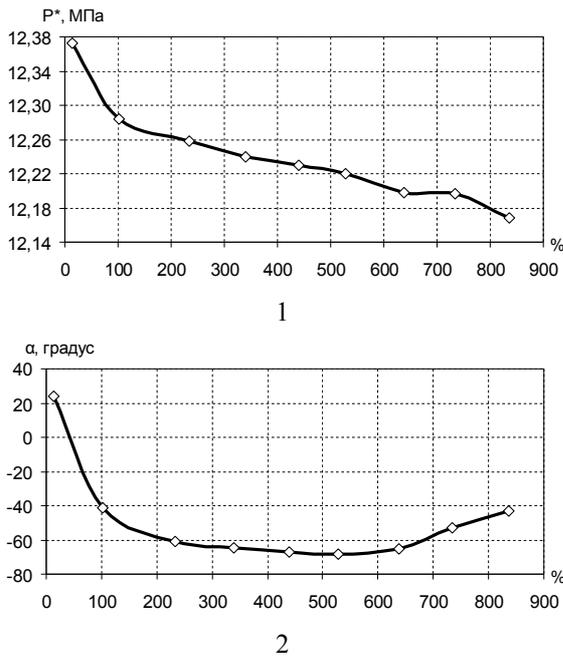


Рис. 6. Распределение параметров по длине уравнильной камеры:
 1 – абсолютное полное давление;
 2 – абсолютный тангенциальный угол

На рис. 7 и 8 сплошной линией изображены распределения P^* и T^* по высоте канала в сечениях на входе и выходе уравнильной камеры, построенные по осреднённым в окружном направлении данным. Также отмечены диапазоны отклонения от среднего значения в представленных сечениях.

Видно, что конфузорность канала перед НА2 способствует выравниванию распределений по высоте для средних значений P^* и T^* . Для полного давления средняя толщина полосы отклонений уменьшается с 0,66 МПа до 0,27 МПа, а для температуры – с 30,33 К до 6,72 К. Наибольшие значения отклонений сосредоточены в периферийной области канала, а наименьшие – в корневой зоне. При натекании на направляющий аппарат 2-й ступени значения пульсаций P^* в части канала от середины и до периферии по величине достаточно близки к тем, которые образуются после выхода из рабочего колеса первой ступени, и составляют 1,9 % от абсолютной величины. Значения пульсаций T^* в части канала \bar{T} от 0,9 до 1,0 составляют 1,3 % от абсолютной величины.

На рис. 9 представлены распределения по каналам нагруженности РК регулирующей ступени и расходной компоненты скорости за ним. Видно сходное поведение полученных распределений. Основной вклад в формирование суммарной полезной мощности рабочего колеса вносят каналы № 3-16. В каналах, в которых наблюдается уменьшение расхода пара, соответственно уменьшается мощность.

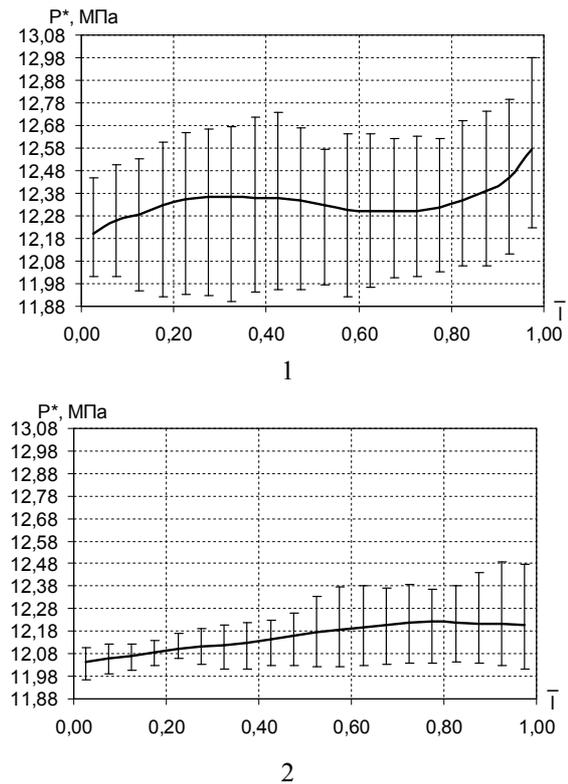


Рис. 7. Распределение P^* по высоте:
 1 – за РК1; 2 – перед НА2

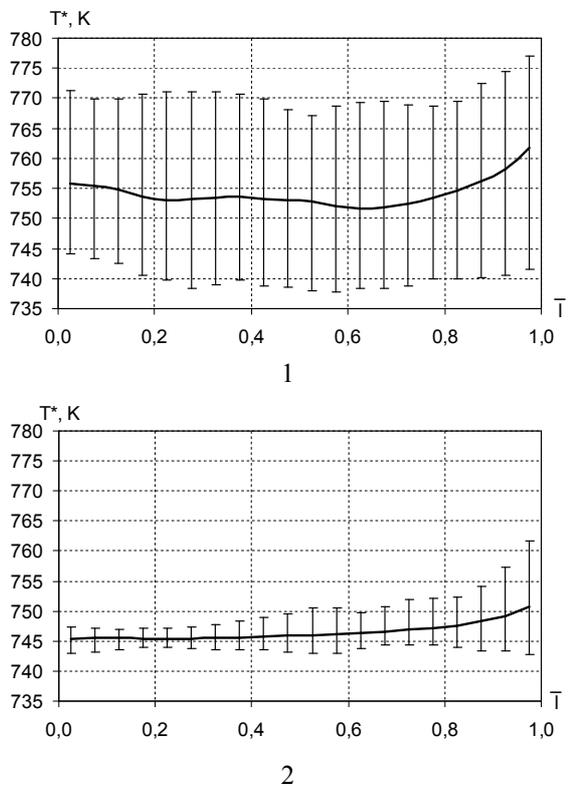


Рис. 8. Распределение T^* по высоте:
 1 – за РК1; 2 – перед НА2

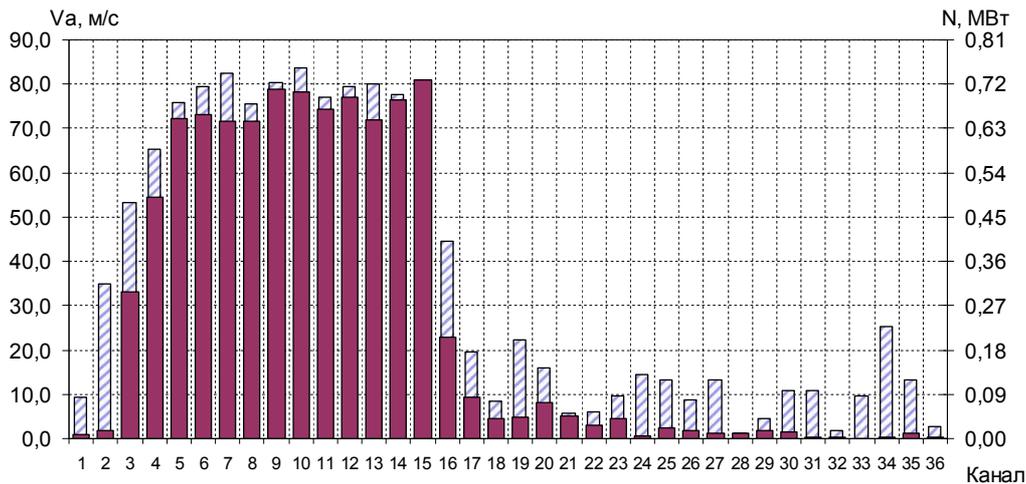


Рис. 9. Неравномерность нагруженности РК1

■ – расходная компонента скорости; ■ – мощность

В таблице 2 приведены коэффициенты неравномерности полного давления и температуры торможения, определяемые из соотношения

$$\Phi_F = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\max} + F_{\min}} \cdot 100\%,$$

где F_{\max} , F_{\min} – максимальное и минимальное значения величины F в заданном сечении.

Также представлена неравномерность среднеквадратичного отклонения δ_α для абсолютного тангенциального угла.

Неравномерность полного давления в абсолютном движении от входа до выхода камеры выравнивания уменьшилась более чем в два раза. Стоит отметить, что основное выравнивание происходит сразу после поворота в уравнительную камеру (234 % ширины).

Неравномерность полной температуры в уравнительной камере уменьшилась почти в шесть раз по сравнению со значением за РК. В отличие от давления, выравнивание температуры происходит по всей длине уравнительной камеры.

Среднее отклонение тангенциального угла уменьшилось более чем в пять раз. Стоит отметить ступенчатый характер процесса выравнивания. Основное воздействие уравнительной камеры наблю-

дается в области поворота за РК 1-й ступени (234 % ширины) и в конфузторной части канала перед НА 2-й ступени (после 733,8 % ширины).

Заключение

В результате проведенных исследований установлены особенности пространственного турбулентного течения пара в регулирующем отсеке ЦВД паровой турбины К-325-23,5 на частичном режиме работы с парциальностью 0,4.

Получены численные оценки окружной неравномерности параметров потока в регулирующей ступени и уравнительной камере. Представлено распределение нагруженности межлопаточных каналов РК первой ступени.

При прохождении камеры коэффициент неравномерности полного давления в абсолютном движении уменьшается более чем в 2 раза, а полной температуры – почти в 6 раз (по сравнению со значениями за РК 1-й ступени). В отличие от номинального режима работы среднее значение угла натекания на направляющий аппарат 2-й ступени не совпадает с углом, формируемым перед входом в уравнительную камеру. Отклонения от значения тангенциального угла на выходе уравнительной камеры достигают $\pm 10^\circ$.

Таблица 2

Коэффициенты неравномерности

	Слой, % ширины РК1								
	14,0	102,9	233,9	339,9	440,0	527,2	638,9	733,8	836,8
Φ_{p*}	1,810	1,547	0,751	0,931	0,817	0,898	0,701	0,709	0,786
Φ_{T*}	1,728	1,183	0,708	0,580	0,589	0,524	0,343	0,348	0,312
δ_α , градус	54,02	34,27	22,34	16,76	20,37	18,42	16,47	20,05	9,68

Литература

1. *Енергетична стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс] / КМ України. – 2006. – 166 с. – Режим доступу: <http://eircenter.com/ua-analitika/energetichna-strategiya-ukrayini-na-period-do-2030-r-proekt>. – 3.04.2015.*
2. *Повышение эффективности работы 2-й ступени ЦВД турбины К-325-23,5 при нерасчетных углах обтекания потока [Текст] / А. В. Русанов, Е. В. Левченко, В. Л. Швецов [и др.] // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование : сб. науч. тр. – 2010. – Вып. 3. – С. 12–18.*
3. *Русанов, А. В. Исследование структуры потока в регулирующем отсеке ЦВД паровой турбины К-325-23,5 [Текст] / А. В. Русанов, А. И. Косьянова, Д. Ю. Косьянов // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 2. – С. 20–24.*
4. *Пути снижения отрицательного влияния регулирующей ступени на экономичность последующих нерегулируемых ступеней паровой турбины [Текст] / А. Е. Зарянкин, С. В. Арианов, В. А. Зарянкин [и др.] // Проблемы машиностроения. – 2006. – № 4(9). – С. 46–51.*
5. *Бойко, А. В. Численное исследование эффективности уравнительной камеры за регулирующей ступенью на разных режимах работы [Текст] / А. В. Бойко, А. П. Усатый, Е. П. Авдеева // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование : сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 1(1044). – С. 6–11.*
6. *Оценка влияния межвенцового зазора на эффективность регулирующей ступени на переменном режиме [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говоруценко, А. П. Усатый [и др.] // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование : сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 7. – С. 49–53.*
7. *Фичоряк, О. М. Исследование и разработка способов повышения эффективности работы мощных теплофикационных турбин [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.12 / Фичоряк Ольга Михайловна ; Московский энергетический ин-т (ТУ). – М., 2007. – 20 с.*
8. *А. с. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовінцевих турбомашинах «FlowER» [Текст] / С. В. Єршов, А. В. Русанов ; Державне агентство України з авторських та суміжних прав. – ПА № 77 ; опубл. 19.02.96. – 1 с.*

Поступила в редакцію 28.05.2015, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., член-корреспондент НАН Украины А. Л. Шубенко, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОТОКУ В РЕГУЛЮЮЧОМУ ВІДСІКУ ЦВТ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ К-325-23,5 НА РЕЖИМІ ПАРЦІАЛЬНОСТІ 0,4

А. В. Русанов, А. І. Косьянова, Д. Ю. Косьянов

Представлено результати чисельного дослідження просторової в'язкої турбулентної течії в проточній частині відсіку ЦВТ парової турбіни К-325-23,5, що складається з регулюючого ступеня та вирівнюючої камери, на режимі парціальності 0,4. Наведено нерівномірний розподіл навантажень в робочому колесі регулюючого ступеня. Виконано оцінку нерівномірності повних тиску та температури в абсолютному русі в різних перерізах вирівнюючої камери. При проходженні камери коефіцієнт нерівномірності повного тиску в абсолютному русі зменшується більш ніж в 2 рази, а повної температури – майже в 6 разів.

Ключові слова: проточна частина, тривимірна в'язка течія, регулюючий ступінь, вирівнююча камера.

RESEARCH OF STREAM FLOW STRUCTURE IN REGULATIVE COMPARTMENT OF THE HPC OF STEAM TURBINE K-325-23,5 WITH PARTIAL 0,4

A. V. Rusanov, A. I. Kosianova, D. Yu. Kosianov

The results of numerical research of spatial viscous turbulent flow in flow part of the control stage and equalizing chamber of the high-pressure cylinder of steam turbine K-325-23,5 with partial 0.4 are presented. The estimation of the non-uniformity of total pressure and temperature in absolute motion in different sections of the equalizing chamber is shown. The distribution of non-uniform load in the impeller of control stage is shown. With the passage of the camera irregularity factor of the total pressure in absolute motion is reduced by more than 2 times, and the total temperature – almost 6 times.

Key words: flow part, three-dimensional viscous flow, the control stage, equalizing chamber.

Русанов Андрей Викторович – д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Украины, зам. директора по научной работе, зав. отделом гидроаэромеханики энергетических машин, ИПМаш НАН Украины, Харьков, e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

Косьянова Анна Игоревна – ведущий инженер, ИПМаш НАН Украины, Харьков, e-mail: akuniver@rambler.ru, kosianova_ann@ipmach.kharkov.ua.

Косьянов Дмитрий Юрьевич – канд. техн. наук, докторант, ИПМаш НАН Украины, Харьков.