

УДК 621.165

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

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В РЕГУЛИРУЮЩЕМ ОТСЕКЕ ЦВД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-325-23,5

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 номинальном режиме работы турбины. Показано неравномерное распределение нагрузки в рабочем колесе регулирующей ступени. Выполнена оценка неравномерности полного давления, температуры и тангенциального угла в абсолютном движении в различных сечениях уравнительной камеры. Приведено значение потерь полного давления в камере.

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

Введение

По прогнозным данным доля тепловой энергетики Украины в общем объеме 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 потока, влияние которой распространяется на эффективность последующей ступени и цилиндра высокого давления (ЦВД) в целом [3].

Для определения направлений газодинамического совершенствования отсека регулирующей ступени необходимо изучение пространственной структуры турбулентного потока [3–5], в том числе с использованием методов математического моделирования [6].

В статье представлены результаты численного исследования трехмерного течения пара в отсеке регулирующей ступени на номинальном режиме работы турбины, а также определена степень неравномерности потока в ней. Определены потери полного давления в уравнительной камере. Показано, что даже для номинального режима работы существует значительная неравномерность нагруженности рабочего колеса регулирующей ступени. 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, 2).

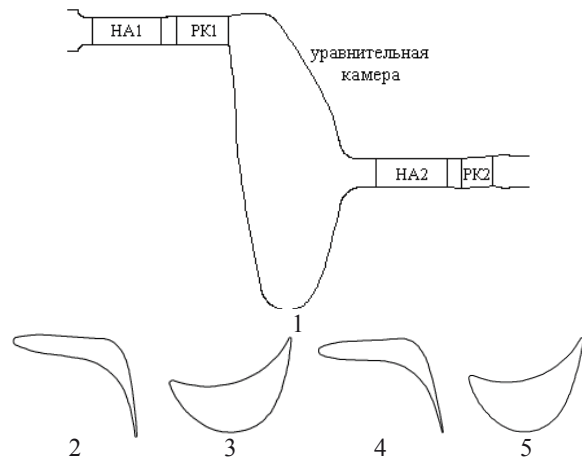


Рис. 1. Исследуемая проточная часть: 1 – меридиональное сечение; 2 – НА регулирующей ступени; 3 – РК регулирующей ступени; 4 – НА первой ступени давления; 5 – РК первой ступени давления

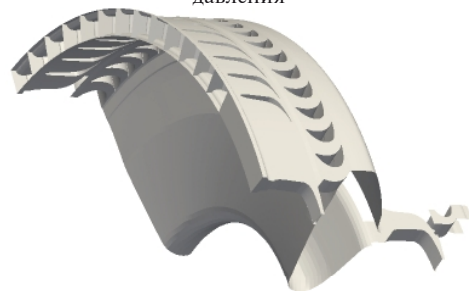


Рис. 2. Пространственный вид расчетной области

Основные геометрические характеристики ступеней приведены в табл. 1. Для регулирования режима работы используется парциальный подвод пара через 4 одинаковые сопловые коробки, расположенные перед первой ступенью ЦВД (рис. 3). На номинальном режиме работы пар подается через все коробки, что соответствует режиму с парциальностью $\varepsilon = 0.8$. Учитывая периодичность по геометрическим и режимным параметрам в первой ступени, выполнено упрощение задачи. В результате расчетная область составлена из каналов одной сопловой коробки (13 открытых каналов, соответствующих парциальности 0.2, и закрытая часть), а также 18 каналов РК1. Для более

корректного моделирования распределения параметров в камере смешения дополнительно учтена вторая ступень (по одному каналу НА2 и РК2).

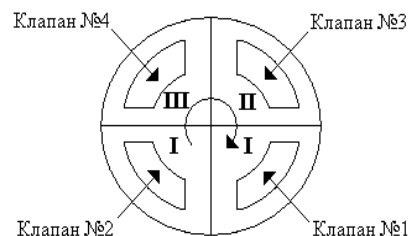


Рис. 3. Схема подвода пара

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.

Численное исследование проведено с помощью математической модели трехмерного турбулентного течения пара, которая обладает необходимой достоверностью получаемых результатов, как по качественной структуре потока, так и по количественной оценке аэродинамических характеристик проточных частей турбомашин [6–8].

Расчеты выполнены с использованием уравнения состояния совершенного газа на сетке с суммарным числом 8,73 млн ячеек при условиях, соответствующих номинальному режиму работы турбины: частота вращения ротора – 3000 об/мин; полная температура на входе – 535,809 °С; полное давление на входе – 22,82 МПа; статическое давление на выходе – 18,783 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. 4, 5 и 6 представлены распределения в окружном направлении полного 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 соответствуют фиксированному моменту времени. Видно, что след от закрытой части клапанной коробки наиболее проявляется в диапазоне $50^\circ - 90^\circ$ в сечении 14,4% уравнительной камеры (рис. 4–6).

По мере продвижения вниз по потоку окружная неравномерность уменьшается. На рис. 7 и 8 представлено изменение параметров потока по длине уравнительной камеры. Потери полного давления на данном участке определяются по формуле [3]:

$$\Delta P = \frac{P_{вх}^* - P_{вых}^*}{P_{вх}^*} \cdot 100\% = 0,667\%,$$

где $P_{вх}^*$, $P_{вых}^*$ – значения на выходе из РК1 (сечение 14,4%) и на входе в НА2 (слой 838,5%), осредненные по расходу, МПа.

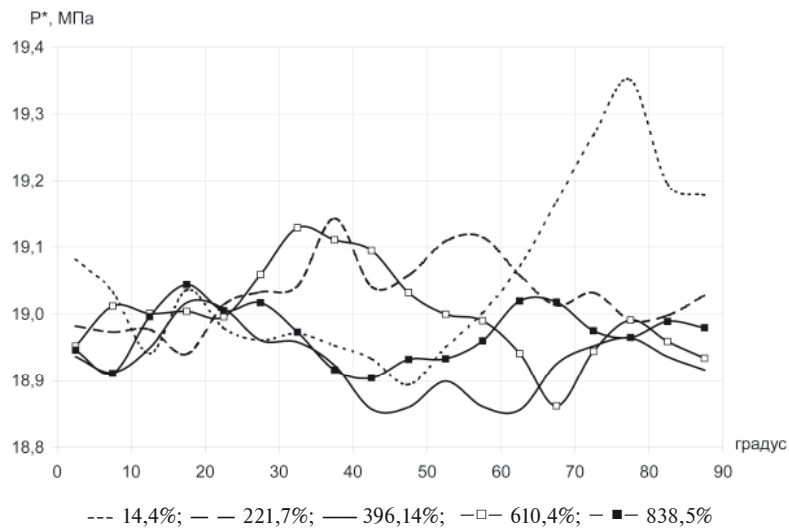


Рис. 4. Распределение P^* в окружном направлении

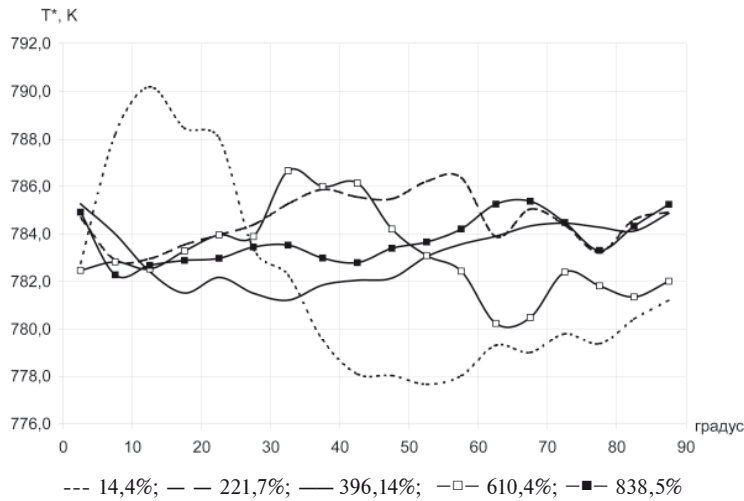


Рис. 5. Распределение T^* в окружном направлении

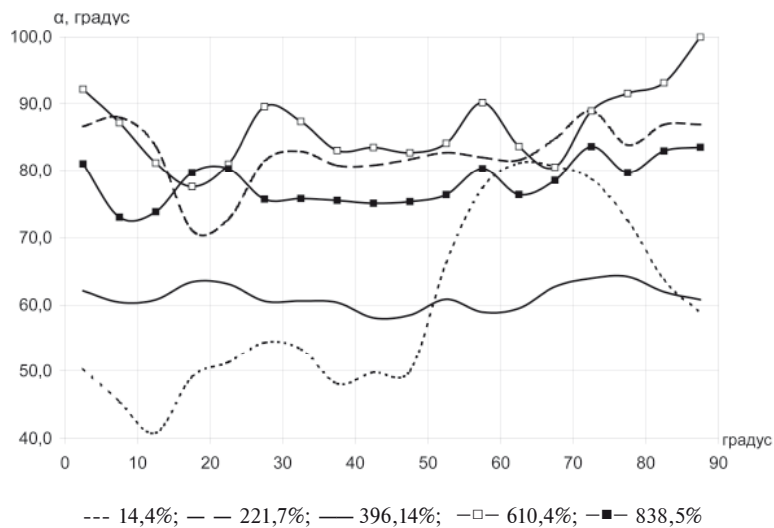


Рис. 6. Распределение α в окружном направлении

Локальные максимумы мгновенных потерь полного давления (рис. 7) связаны с нестационарными процессами в РК1 и уравнильной

камере. Средний угол натекания на НА2 совпадает с углом, формируемым перед входом в уравнильную камеру (рис. 8).

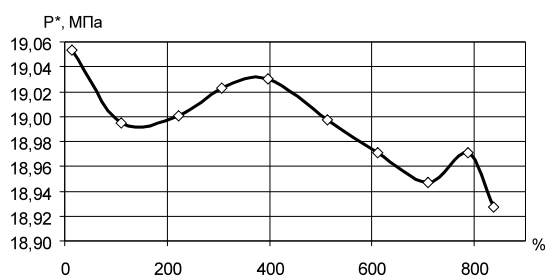


Рис. 7. Распределение P^* по длине уравнильной камеры

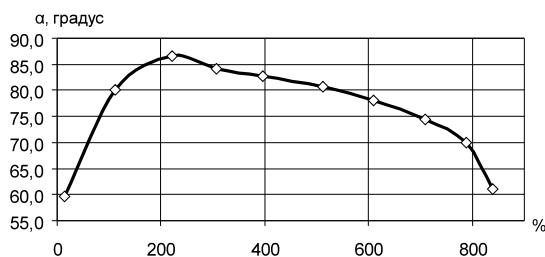


Рис. 8. Распределение α по длине уравнильной камеры

На рис. 9 и 10 сплошной линией изображены распределения P^* по высоте канала в сечениях на входе и выходе уравнильной камеры, построенные по осредненным в окружном направлении данным. Также отмечены диапазоны отклонения от среднего значения в представленных сечениях.

Из рис. 10 видно влияние конфузурности канала перед НА2 на выравнивание распределения P^* по высоте. Максимальные отклонения от среднего значения сосредоточены в прикорневой области.

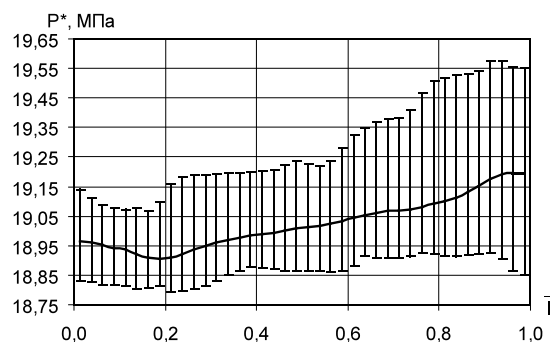


Рис. 9. Распределение P^* по высоте за РК1

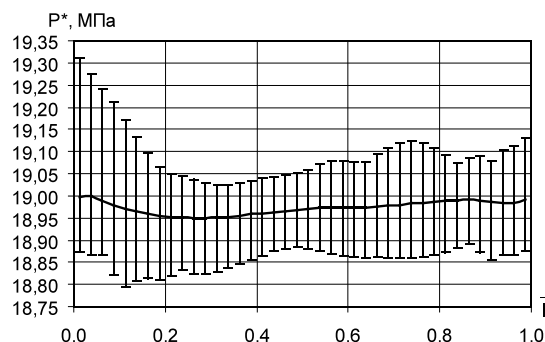
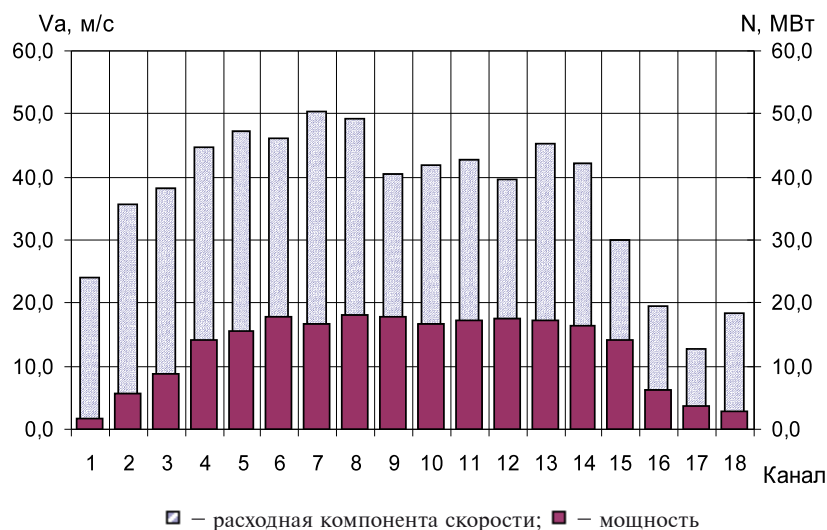


Рис. 10. Распределение P^* по высоте перед НА2

На рис. 11 представлена неравномерность в окружном направлении нагруженности РК регулирующей ступени и распределения радиальной компоненты скорости за ним.

Прослеживается корреляция рассмотренных величин. Влияние зоны неактивной части НА1 распространяется на 5–6 каналов РК1 и сопровождается существенными вторичными течениями (рис. 12).



□ – расходная компонента скорости; ■ – мощность
Рис. 11. Неравномерность нагруженности РК1

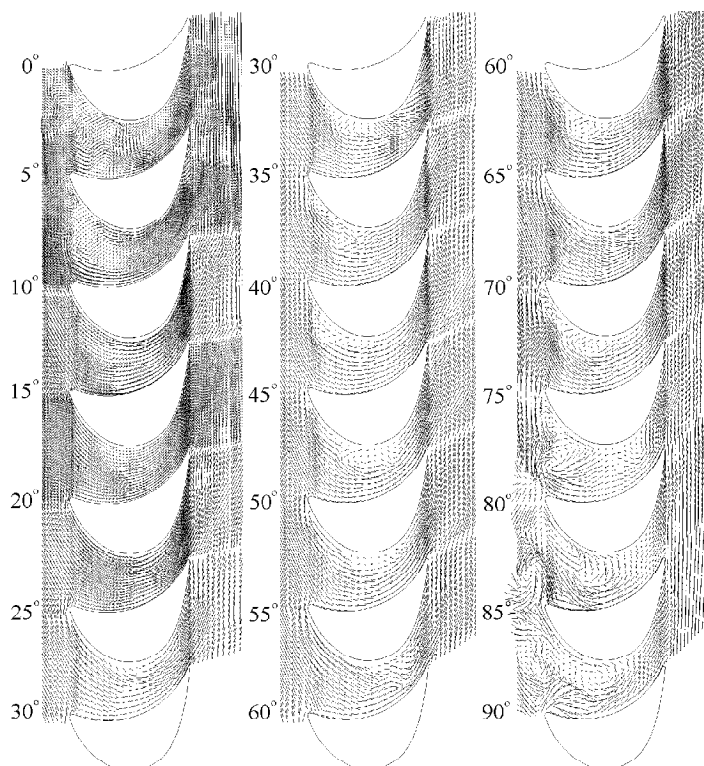


Рис. 12. Векторы скорости в среднем сечении канала РК регулирующей ступени

В таблице 2 приведены коэффициенты неравномерности полного давления, полной температуры и тангенциального угла в абсолютном движении, 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.

Неравномерность полного давления и температуры в абсолютном движении значительно уменьшается (до трех раз) по сравнению со значениями за РК1. Наибольшее влияние уравнивающей камеры наблюдается на распределение тангенциального угла в абсолютном движении (до шести раз).

Таблица 2

Коэффициенты неравномерности

Слой, % ширины РК1	Φ_{p*}	Φ_{T*}	Φ_{α}
14,41	1,195	0,799	33,045
110,88	0,797	0,574	14,311
221,68	0,703	0,409	12,608
307,62	0,685	0,326	14,864
396,14	0,533	0,220	11,157
512,83	0,368	0,196	8,562
610,44	0,369	0,197	6,745
708,76	0,409	0,220	5,655
787,26	0,438	0,254	5,932
838,48	0,425	0,258	5,020

Заклучение

Проведенные исследования показали наличие окружной неравномерности в распре-

делениях параметров потока в регулирующей ступени и уравнивающей камере, а также неравномерность нагруженности РК1 на номинальном режиме работы. При прохождении

камеры коэффициент неравномерности для полного давления и температуры в абсолютном движении значительно уменьшается (до трех раз), а для тангенциального угла — до шести раз. В дальнейших работах планируется исследование структуры потока на режимах работы, соответствующих меньшим значениям парциальности, а также возможных способов совершенствования конструктивных элементов, обеспечивающих парциальный подвод пара.

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>.
2. Русанов А.В. 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, А.И. Косьянова // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. — 2010. — №3. — С. 12-18.
3. Численное исследование эффективности уравнительной камеры за регулирующей ступенью на разных режимах работы / Бойко А. В., Усатый А. П., Авдеева Е. П. // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. — 2014. — №1(1044). — С. 6-11.

4. Оценка влияния межвенцового зазора на эффективность регулирующей ступени на переменном режиме / Бойко А. В., Говорущенко Ю. Н., Усатый А. П., Авдеева Е. П. // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. — 2012. — №7. — С. 49-53.

5. Фичорьяк О.М. Исследование и разработка способов повышения эффективности работы мощных теплофикационных турбин: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки» / Фичорьяк Ольга Михайловна; Московский энергетический институт (ТУ). — Москва, 2007. — 20 с.

6. Русанов А.В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин [Текст]: моногр. / А.В. Русанов, С.В. Ершов. — Х.: ИПМаш НАН Украины, 2008. — 275 с.

7. А. с. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовіцевих турбомашинах «FlowER» / С.В. Ершов, А.В. Русанов; Державне агентство України з авторських та суміжних прав. — ПА №77; опубл. 19.02.96. — 1 с.

8. Lampart P. Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases [Text] / P. Lampart, S. Yershov, A. Rusanov // International conference SYMKOM'02. Turbomachinery, Politechnika Lodzka, Lodz, Poland. — 2002, No. 122. — P. 63-70.

Поступила в редакцию 12.06.2014

А.В. Русанов, А.И. Косьянова, Д.Ю. Косьянов. Дослідження структури потоку в регулюючому відсіку ЦВТ парової турбіни К-325-23,5

Представлено результати чисельного дослідження просторової в'язкої турбулентної течії в проточній частині відсіку проточної частини ЦВТ парової турбіни К-325-23,5, що складається з регулюючого ступеня та вирівнюючої камери, на номінальному режимі роботи турбіни. Наведено нерівномірний розподіл навантажень в робочому колесі регулюючого ступеня. Виконано оцінювання нерівномірності повного тиску, температури та тангенціального кута в абсолютному русі в різних перерізах вирівнюючої камери. Отримано рівень втрат повного тиску вздовж камери.

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

A.V. Rusanov, A.I. Kosianova, D.Yu. Kosianov. Research of stream flow structure in regulative compartment of the HPC of steam turbine K-325-23,5

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 on nominal operating mode are presented. The estimation of the non-uniformity of total pressure, temperature and tangential angle 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. Value of the total pressure losses in the chamber is presented.

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