

УДК 621.165

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

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОТОКА ПАРА В РЕГУЛИРУЮЩЕМ ОТСЕКЕ С РАДИАЛЬНЫМ ПАРЦИАЛЬНЫМ ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Выполнен анализ структуры пространственного течения пара в регулирующем отсеке цилиндра высокого давления паровой турбины с радиальным парциальным парораспределением для 4-х основных режимов работы. Приведены значения коэффициента неравномерности потока в различных поперечных сечениях проточной части. Показано, что при прохождении через рабочее колесо регулирующей ступени неравномерность давления снижается в 15-25 раз, а температуры и радиальной скорости – в 7-9 раз, по сравнению со значениями перед первой ступенью давления. Установлено, что неравномерность потока в ступенях давления на частичных режимах качественно и количественно близка к распределению для номинального режима.

Ключевые слова: паровая турбина, регулирующая ступень, радиальная парциальность, парораспределение, неравномерность потока, пространственное турбулентное течение.

Введение

В современных паровых турбинах большой мощности, таких как новый турбоагрегат К-325-23,5 ОАО «Турбоатом», для регулирования режимов работы используется сопловое парораспределение. В таких конструкциях пар подаётся от регулирующих клапанов по паровпускным каналам к соответствующим сопловым коробкам, расположенным вдоль окружного направления. В коробках размещаются профилированные элементы соплового аппарата первой регулирующей ступени [1–3].

Такой способ компоновки предполагает наличие закрытой части в окрестности мест сопряжения коробок. Поэтому, даже на номинальном режиме работы турбины поток перед рабочим колесом (РК) регулирующей ступени обладает степенью парциальности, отличной от 1. Для турбоагрегата К-325-23,5 при четырёх открытых сопловых коробках степень парциальности составляет 0,8. На частичных режимах часть регулирующих клапанов закрыта (в зависимости от мощности). Как следствие, увеличивается площадь нерабочей зоны и уменьшается значение степени парциальности.

Парциальность соплового аппарата вносит существенную окружную неравномерность в распределение газодинамических параметров как перед РК регулирующей ступени, так и перед первыми ступенями цилиндра высокого давления (ЦВД). В результате происходит снижение газодинамической эффективности отсека, а также имеют место значительные переменные нагрузки на элементы конст-

рукции проточной части [4, 5].

В работе [6] предложен новый подход к организации парциального подвода пара – радиальное парораспределение. На его основе разработан прототип регулирующего отсека для паровой турбины К-325-23,5. В систему соплового парораспределения включены парораспределительная камера и направляющий аппарат регулирующей ступени, разделённые кольцевыми перегородками. Сформированные таким разделением кольцевые области представляют собой самостоятельные сопловые блоки, не содержащие закрытых каналов и заведомо не вносящие окружную неравномерность в поток.

Показано, что предложенная конструкция обеспечивает необходимые режимы работы ЦВД турбины с большей газодинамической эффективностью, чем регулирующий отсек исходной конструкции. Приведены интегральные характеристики разработанных ступеней и отмечено, что влияние радиальной парциальности на параметры газодинамической эффективности в большей мере проявляются в 1-й регулирующей ступени и существенно меньшей во 2-й и 3-й ступенях.

При исследовании влияния парциального подвода на работу регулирующего отсека ЦВД особое внимание уделено вопросам выравнивания пространственного турбулентного течения пара, определения глубины проникновения неравномерности в проточную часть. Целью работы являлось подробное изучение особенностей неравномерной структуры потока в регулирующем отсеке при радиальном парциальном подводе.

1. Геометрические характеристики и режимы работы регулирующего отсека с радиальным парциальным подводом

Теоретическая схема регулирующей ступени с радиальным подводом пара к рабочему колесу показана на рис. 1. Пар подаётся в кольцевые камеры соплового аппарата, разделённые по высоте перегородками.

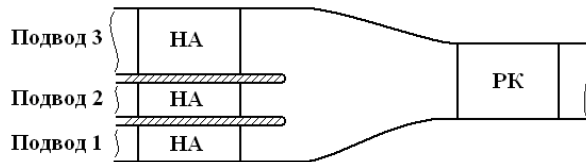


Рис. 1. Схематический вид регулирующей ступени с радиальным парциальным подводом

В табл. 1 приведены условия работы регулирующего отсека ЦВД на основных режимах полной и частичной подачи пара. На режимах №3 и №4 пар поступает в подвод 1. На режиме №2 пар поступает в подводы 2 и 1, на режиме №1 еще и в подвод 3.

В случае применения регулирующей ступени с радиальной парциальностью нет необходимости использования уравнильной камеры. При отсутствии камеры регулирующая ступень выполняется со средним диаметром близким к диаметрам ступеней давлений, а для обеспечения срабатывания необходимого теплового перепада и более оптимальной нагруженности регулирующей ступени, дополнительно, на месте уравнильной камеры устанавливается еще одна ступень давления.

Вид разработанного регулирующего отсека представлен на рис. 2, 2. Прототипом объекта исследования является отсек ЦВД паровой турбины К-325-23,5, состоящий из регулирующей ступени, уравнильной камеры и первой ступени давления (рис. 2, 1).

Таблица 1

Граничные условия для расчётов первых 3-х ступеней ЦВД

Параметр	Режим			
	№1	№2	№3	№4
Полное давление перед 1-й ст., МПа	22,82	21,887	20,565	9,051
Полная температура перед 1-й ст., °С	535,809	533,6	538,2	475,0
Статическое давление за 2-й ст., МПа	16,81	13,439	10,822	4,754
Расход, кг/с	277,8	243,6	165,1	79,5
Степень окружной парциальности	0,8	0,6	0,4	0,4

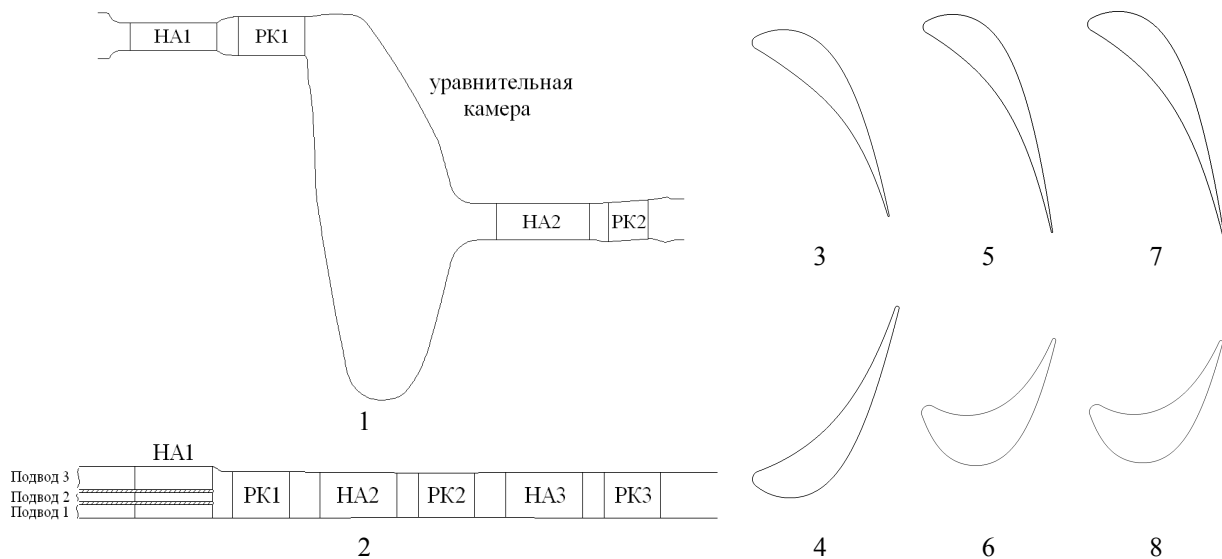


Рис. 2. Проточная часть первых ступеней ЦВД паровой турбины:

- 1 – меридиональное сечение исходной конструкции; 2 – меридиональное сечение новой конструкции;
- 3 – НА 1-й ступени (НА1); 4 – РК 1-й ступени (РК1); 5 – НА 2-й ступени (НА2); 6 – РК 2-й ступени (РК2);
- 7 – НА 3-й ступени (НА3); 8 – РК 3-й ступени (РК3)

Лопатки разработанных ступеней цилиндрические (рис. 2, 3–8). Для реализации частичных режимов конструкция соплового аппарата выполнена с тремя кольцевыми областями со следующими высотами: 10,0 мм корневая, 6,7 мм средняя и 16,7 мм верхняя области. Толщина кольцевых перегородок равна 3 мм. Значение выбрано из условия совпадения высоты НА1 со значением высоты соответствующей лопатки прототипа.

2. Численные результаты

Для численного моделирования объект исследования отображается на многоблочную расчётную область с помощью структурированной сетки H-типа с суммарным количеством 3,28 млн. ячеек. Сеточное сгущение возле непроницаемых стенок характеризуется значениями Y^+ в диапазоне 4÷8.

Для численного исследования течений использовался программный комплекс вычислительной газогидродинамики *IPMFlow*, который является развитием программ *FlowER* и *FlowER-U*. Основными элементами реализованной математической модели являются осреднённые по Рейнольдсу нестационарные уравнения Навье-Стокса (RANS), двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности SST Ментера, неявная квазимонотонная ENO-схема повышенной точности. Результаты расчётов, полученные с использованием программного комплекса *IPMFlow*, обладают необходимой достоверностью как по качественной структуре пространственного

вязкого течения, так и по количественной оценке характеристик изолированных турбинных решеток и проточных частей турбомашин в целом.

В таблице 2 представлены значения коэффициента неравномерности абсолютного полного давления, 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.

Данные вычислены в поперечных слоях (рис. 3), расположенных на заданном расстоянии от входной кромки РК1 (в процентах ширины лопатки РК). На рис. 4 приведены графики распределения коэффициента неравномерности статического (P) и абсолютного полного (P0a) давлений, статической (T) и абсолютной полной температуры (T0a), а также среднеквадратичного отклонения δ_α для радиальной компоненты скорости (V_r).

На рис. 5 представлены распределения по высоте канала для абсолютного полного давления, статической температуры и радиальной скорости на частичных режимах №2 и №3. Видно, что внутри РК 1-й ступени при продвижении к выходу наблюдается выравнивание потока по всей высоте канала. При этом основной поток смещается из прикорневой области к периферии с образованием зон вторичных течений.

Таблица 2

Коэффициент неравномерности абсолютного полного давления

Номер режима	Номер слоя, % ширины РК1									
	Слой 1 -16,9%	Слой 2 9,9%	Слой 3 50,9%	Слой 4 90,9%	Слой 5 115,1%	Слой 6 Перед НА2	Слой 7 Перед РК2	Слой 8 Перед НА3	Слой 9 Перед РК3	Слой 10 За РК3
1	0,91	0,69	0,57	0,19	0,14	0,17	3,31	0,30	2,83	0,46
2	7,84	7,66	3,38	1,32	0,79	0,48	3,43	0,27	2,65	0,51
3	18,35	17,94	6,81	2,19	1,04	0,80	0,49	0,15	1,18	0,19
4	20,17	12,97	7,62	2,45	1,30	0,82	1,90	0,25	2,01	0,24

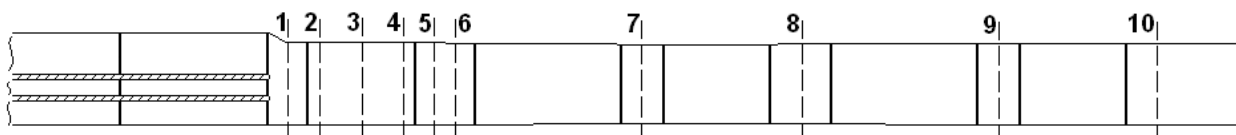
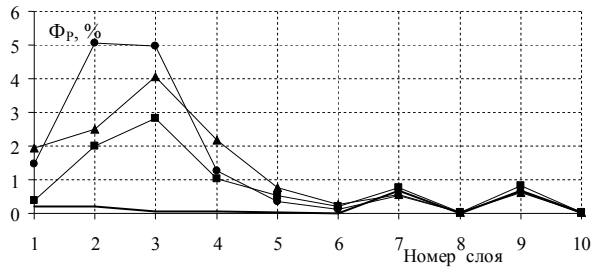
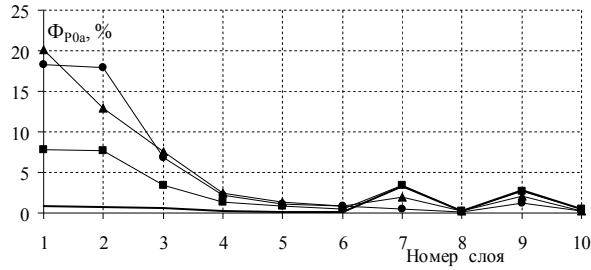


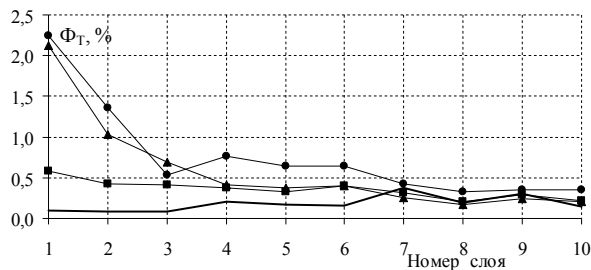
Рис. 3. Схематическое расположение поперечных слоёв в регулирующем отсеке



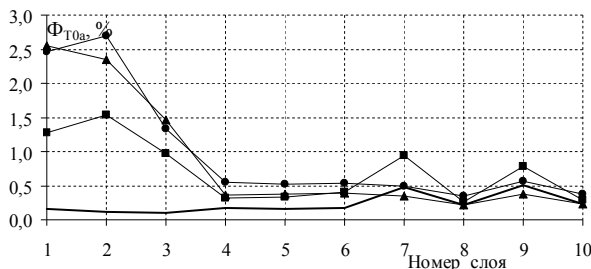
а



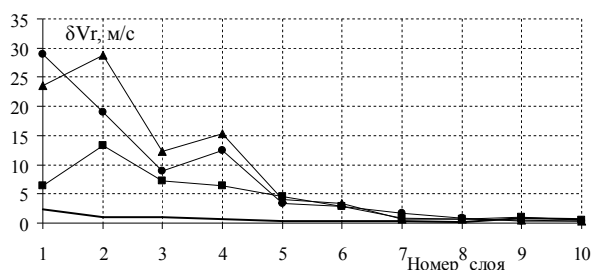
б



в



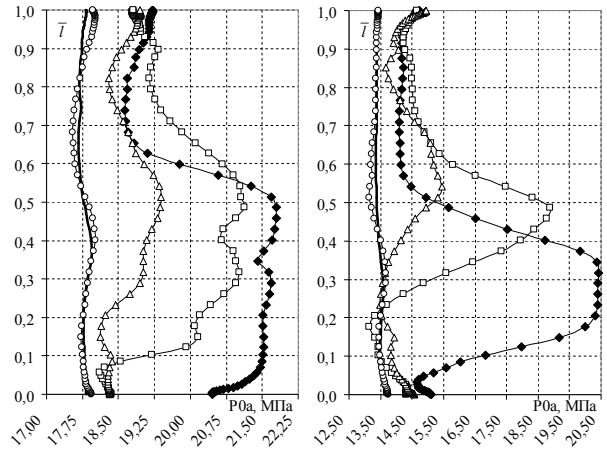
г



д

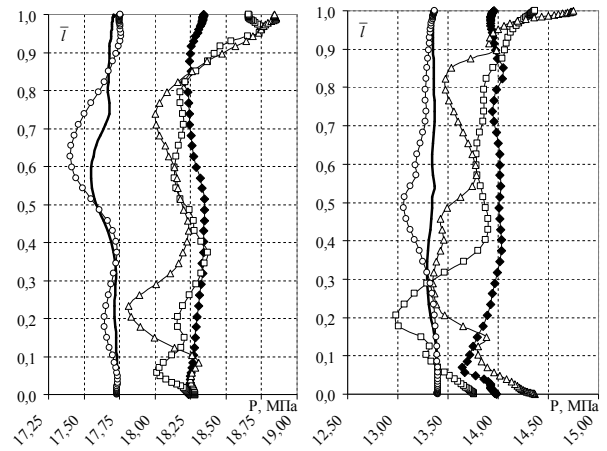
—■— режим №1; —□— режим №2;
—▲— режим №3; —●— режим №4

Рис. 4. Распределения коэффициента неравномерности:
а – статическое давление;
б – абсолютное полное давление;
в – статическая температура;
г – абсолютная полная температура;
д – радиальная компонента скорости



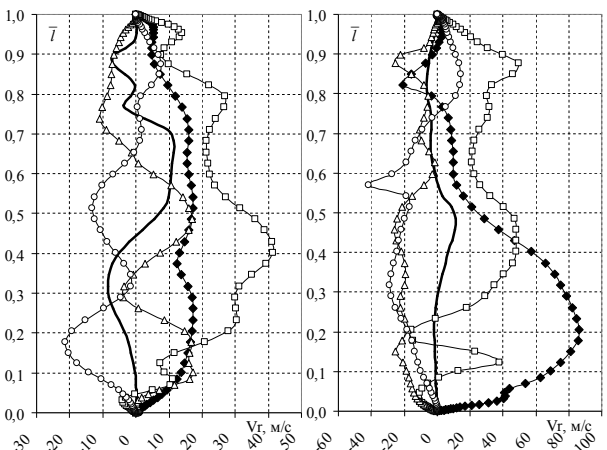
а

б



в

г



д

е

—◆— слой 1; —□— слой 2; —△— слой 3;
—○— слой 4; —■— слой 5

Рис. 5. Структура потока в сечениях рабочего колеса 1-й ступени:

а, в, д – режим №2; б, г, е – режим №3;
а, б – абсолютное полное давление;
в, г – статическое давление;
д, е – радиальная скорость

Из представленных на рис. 4 графиков видно, что основное влияние от радиального парораспределения сосредоточено между сечениями с номерами 1 и 6. Эта область полностью соответствует расположению рабочего колеса первой ступени.

Снижение степени парциальности приводит к увеличению коэффициента неравномерности и среднего квадратичного отклонения компоненты скорости. Наибольшей неравномерностью обладают распределения параметров P_{0a} и P на режимах №3 и №4.

Анализ данных в сечениях после 7-го показывает, что количественно и качественно неравномерность потока на частичных режимах близка к распределению для номинального режима, отмеченного сплошной линией без маркеров. Наиболее отчетливо это прослеживается по графикам статического давления, где одинаково наблюдается повышение неравномерности потока перед рабочими колёсами 2-й и 3-й ступеней (сечение 7 и 9 соответственно) и её уменьшение на выходе из них (сечения 8 и 10 соответственно).

На режимах №3 и №4 при прохождении потоком РК регулирующей ступени наибольшее значение коэффициента неравномерности P и P_{0a} уменьшается в 15–25 раз, а для остальных компонент – в 7–9 раз по сравнению со значениями перед 1-й ступенью давления.

Заключение

Выполнен анализ структуры пространственно-турбулентного течения пара в регулирующем отсеке цилиндра высокого давления паровой турбины с радиальным парциальным парораспределением. Установлено, что основное снижение коэффициента неравномерности происходит в рабочем колесе регулирующей ступени. Для ступеней давления отмечено, что степень неравномерности потока на частичных режимах качественно и количественно совпадает с распределением для номинального режима.

Литература

1. Кострыкин, В. А. Теория тепловых процессов и современные проблемы реновации паротурбинных установок [Текст] : монография / В. А. Кострыкин, И. Г. Шелепов, А. Л. Шубенко. – Х., 2007. – 208 с.
2. Субботин, В. Г. Паровые турбины ОАО «Турбоатом» для тепловых электростанций [Текст] / В. Г. Субботин, Е. В. Левченко, В. Л. Швецов // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – Вып. 3. – С. 6–17.
3. Щегляев, А. В. Паровые турбины: теория теплового процесса и конструкции турбин [Текст] : в

2 кн. - кн. 2 / А. В. Щегляев. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 416 с.

4. Использование перфорированных экранов в камере регулирующей ступени паровой турбины с сопловым парораспределителем [Текст] / А. Е. Зарянкин, С. В. Арианов, В. А. Зарянкин [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 1. – С. 10–15.

5. Fridh, J. Experimental investigation of performance, flow interactions and rotor forcing in axial partial admission turbines [Text] : Doctoral Thesis / J. Fridh. – Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2012. – 18 p.

6. Русанов, А. В. Разработка нового способа парциального парораспределения для обеспечения частичных режимов работы мощных паровых турбин [Текст] / А. В. Русанов, А. И. Косьянова, Д. Ю. Косьянов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/8(78). – С. 24–28.

References

1. Kostrykin, V. A., Shelepov, I. G., Shubenko, A. L. *Teorija teplovyh processov i sovremennyye problemy renovacii paroturbinyh ustanovok* [The theory of thermal processes and problems of modern renovation of steam turbines]. Kharkov, 2007, 208 p.
2. Subbotin, V. G., Levchenko, E. V., Shvecov, V. L. *Parovye turbiny OAO «Turboatom» dlja teplovyh jelektrostantsij* [Steam turbines of PJSC «Turboatom» for thermal power stations]. Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie, 2009, no. 3, pp. 6–17.
3. Shhegljaev, A. V. *Parovye turbiny: teorija teplovogo processa i konstrukcii turbin* [Steam-turbines: theory of thermal process and construction of turbines]. Moscow, Jenergoatomizdat, 1993, 416 p.
4. Zarjankin, A. E., Arianov, S. V., Zarjankin, V. A., Paramonov, A. N., Fichorjak, O. M. *Ispolzovanie perforirovannyh jekranov v kamere regulirujushhej stupeni parovoj turbiny s soplovyim paroraspredeletem* [Using of perforated screens in the chamber of the control stage of steam-turbine with steam distributor nozzle]. Tjzheloe mashinostroenie, 2007, no. 1, pp. 10–15.
5. Fridh, J. Experimental investigation of performance, flow interactions and rotor forcing in axial partial admission turbines. Doc. Diss. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2012.
6. Rusanov, A. V., Kos'janova, A. I., Kos'janov, D. Ju. *Razrabotka novogo sposoba parcial'nogo paroraspredelenija dlja obespechenija chastichnyh rezhimov raboty moshhnyh parovyh turbin* [Development of new partial steam admission method for providing partial modes of powerful steam turbines]. Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij, 2015, no. 6/8(78), pp. 24–28.

Поступила в редакцию 4.06.2016, рассмотрена на редколлегии 15.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр. отдела гидроаэромеханики энергетических машин Л. В. Колодяжная, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОТОКУ ПАРИ В РЕГУЛЮЮЧОМУ ВІДСІКУ З РАДІАЛЬНИМ ПАРЦІАЛЬНИМ ПАРОРозПІДЛОМ

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

Виконано аналіз структури просторової течії пари в регулюючому відсіку циліндра високого тиску парової турбіни з радіальним парціальним паророзподілом для 4-х базових режимів роботи. Наведено значення коефіцієнта нерівномірності потоку в різних поперечних перерізах проточної частини. Показано, що при проходженні крізь робоче колесо регулюючого ступеня нерівномірність тиску зменшується у 15–25 разів, а температури та радіальної швидкості – у 7–9 разів у порівнянні зі значеннями перед першим ступенем тиску. Встановлено, що нерівномірність потоку в ступенях тиску на часткових режимах якісно і кількісно близька до розподілу номінального режиму.

Ключові слова: парова турбіна, регулюючий ступінь, радіальна парціальність, паророзподіл, нерівномірність потоку, просторова турбулентна течія.

RESEARCH OF SPATIAL STREAM OF STEAM IN REGULATIVE COMPARTMENT WITH RADIAL PARTIAL

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

The analysis of spatial structure flow of steam in the control compartment of steam-turbine high-pressure cylinder with radial partial for 4th main modes is executed. Values over of unevenness coefficient of flow in the different cross-sections of flow part are brought. It is shown that at passing of stream through the rotor of the control stage unevenness of pressure goes down in 15-25 times, and temperature and radial speed of – in 7-9 times, as compared with the values before the first stage of pressure. Determined that unevenness of stream in the stages of pressure on the partial modes qualitatively and quantitatively near to the distribution for the nominal mode.

Key words: steam turbine, control stage, radial partial, steam distribution, unevenness of stream, spatial turbulent flow.

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

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

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

Rusanov Andrey – Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Head of Department for Bladed Machinery A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine, e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

Kosianov Dmitry – PhD, Postdoctoral fellow, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Kosianova Anna – Leading Engineer, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine, e-mail: akuniver@rambler.ru, kosianova_ann@ipmach.kharkov.ua.