

8. Tahseen, T. A. A numerical study of forced convection heat transfer over a series of flat tubes between parallel plates [Text] / T. A. Tahseen, M. Ishak, M. M. Rahman // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 2012. – Vol. 3. – P. 271-280.
9. Zeinab, S. A.-R. Heat Transfer Characteristics and Fluid Flow past Staggered Flat-Tube Bank Using CFD [Text] / S. A.-R. Zeinab // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. – 2013. – Vol. 7, Issue 10. – P. 842–848.
10. Ishak, M. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop characteristics of air flow over a staggered flat tube bank in crossflow [Text] / M. Ishak, T. A. Tahseen, Md. Mustafizur Rahman // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 7. – P. 900–911.
11. Tahseen, T. A. An experimental study of air flow and heat transfer over in-line flat tube bank [Text] / T. A. Tahseen, M. M. Rahman, M. Ishak // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 9. – P. 1487–1500.
12. Кондратюк, В. А. Аэродинамическое сопротивление поперечно-омываемых шахматных пакетов плоско-овальных труб [Текст] / В. А. Кондратюк, В. Е. Туз, А. М. Терех, Ю. В. Жукова, А. Ж. Мейрис // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/8 (57). – С. 39–42. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/4074/3740>
13. Письменный, Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб [Текст] / Е. Н. Письменный. – Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.

*Запропонована нова конструкція регулюючого відсіку циліндру високого тиску парової турбіни К-325-23,5, виконаного з використанням радіального паророзподілення, що призначена для забезпечення часткових режимів роботи парової турбіни. Наведено візуалізація течії та інтегральні характеристики розробленої проточної частини, а також виконано аналіз особливостей фізичних процесів, що виникають при радіальному підводі пари*

*Ключові слова: парова турбіна, регулююча ступінь, радіальна парціальність, паророзподілення, просторова турбулентна течія*

*Предложена новая конструкция регулирующего отсека цилиндра высокого давления паровой турбины К-325-23,5, выполненного с использованием радиального парораспределения, предназначенная для обеспечения частичных режимов работы паровой турбины. Приведены визуализация течения и интегральные характеристики разработанной проточной части, а также выполнен анализ особенностей физических процессов, возникающих при радиальном подводе пара*

*Ключевые слова: паровая турбина, регулирующая ступень, радиальная парціальность, парораспределение, пространственное турбулентное течение*

УДК 621.165

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55527

## РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА ПАРЦИАЛЬНОГО ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

А. В. Русанов

Член-корреспондент НАН Украины,  
доктор технических наук, профессор  
заместитель директора по научной работе,  
заведующий отделом\*

E-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua

А. И. Косьянова

Ведущий инженер\*

E-mail: akuniver@rambler.ru

Д. Ю. Косьянов

Кандидат технических наук\*\*

E-mail: kosyanov@ipmach.kharkov.ua

\*Отдел гидроаэромеханики энергетических машин

\*\*Институт проблем машиностроения

им. А. Н. Подгорного НАН Украины

ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

### 1. Введение

На сегодняшний день использование мощностей ТЭС осуществляется не только в базовом, но и в маневренных режимах для пиковых и полупиковых

нагрузок потребления электроэнергии. Анализ состояния ТЭС Украины показывает, что существует необходимость замены или реконструкции большей части энергоблоков, которые к настоящему времени отработали свой ресурс, физически и морально уста-

рели. Для модернизации энергоблоков мощностью 300 МВт возможно использовать новый турбоагрегат К-325-23,5 ОАО «Турбоатом» (Украина, Харьков) [1], у которого парораспределение в цилиндре высокого давления (ЦВД), как и у большинства паровых турбин большой мощности, сопловое. Используются 4 сопловые парораспределительные коробки первой регулирующей ступени (РС).

В таких турбинах все основные изменения в структуре потока, связанные с режимом работы, происходят в регулирующем отсеке, состоящем из первой (регулирующей) и второй (первой ступени давления) ступеней, а также расположенной между ними уравнительной камеры (УК). Как правило, РС является более нагруженной, чем последующие ступени и имеет низкий КПД на всех режимах работы, а УК обладает высоким аэродинамическим сопротивлением.

В работе [2] показано, что разброс относительного полного давления на выходе из РС может составлять более 2 % для режима с половиной от номинального расхода. Потери давления в уравнительной камере за РС составят около 2 % от полного давления на входе.

В работе [3] на примере четырёхступенчатой осевой проточной части показано, что окончательное выравнивание потока происходит внутри четвёртой ступени, хотя наиболее значительная его часть приходится на первую ступень. Наибольшее влияние на процесс выравнивания оказывает уравнительная камера. Наименьшее выравнивание наблюдается для полной температуры потока.

В работе [4] с использованием физического эксперимента показано, что наличие окружной неравномерности приводит не только к уменьшению газодинамической эффективности, но и к возникновению существенных нестационарных нагрузок, действующих на элементы конструкции проточной части. Более подробные результаты в данном направлении получены с помощью вычислительного эксперимента в работе [5].

---

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

---

В настоящее время решение проблемы повышения газодинамической эффективности регулирующего отсека при сопловом парораспределении развивается по следующим направлениям:

- разработка систем эффективного регулирования и оптимизации параметров турбоустановок с учётом их работы на частичных и форсированных режимах [6];
- исследование влияния режима работы (конфигурации подвода по окружности) на эффективность работы регулирующей ступени и отсека в целом [2, 4, 7];
- повышение эффективности отсека РС за счёт выбора оптимальных значений параметров существующей конструкции: межвенцового зазора [8]; ширины уравнительной камеры (межступенчатый зазор) [9]; формы лопаток рабочего колеса (РК) РС, обеспечивающих оптимальную закрутку потока на входе в УК [10]; лопатки направляющего аппарата (НА) первой ступени давления, малочувствительные к нерасчетным углам натекания [11];
- повышение эффективности отсека РС за счёт использования дополнительных элементов выравнивания окружной неравномерности [12];

- совершенствование методов математического и физического моделирования с целью более точного прогнозирования нестационарных силовых воздействий потока на лопатки РС и последующих ступеней [13].

Во всех рассмотренных направлениях принимается существующая система парораспределения с окружной парциальностью и УК, из-за чего, по мнению авторов, теоретически невозможно достичь существенного улучшения работы регулирующего отсека на номинальном режиме и обеспечить отсутствие окружной неравномерности на частичных режимах.

В то же время, научный и практический интерес может представлять организация парциального подвода рабочего тела с радиальным парораспределением. В работе на основе данного подхода разработан прототип регулирующего отсека для паровой турбины К-325-23,5 без уравнительной камеры. Исследования выполнены численно с помощью программного комплекса IPMFlow и метода проектирования проточных частей ступеней турбин [14].

---

## 3. Цель и задачи исследования

---

Целью работы является разработка нового способа парциального парораспределения для обеспечения частичных режимов работы паровой турбины К-325-23,5.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- предложить теоретический вид конструкции с радиальным парораспределением и способ моделирования номинального и частичных режимов работы ЦВД паровой турбины К-325-23,5;
- выполнить проектирование отсека из 3-х ступеней на перепад, отведенный для регулирующей ступени и первой ступени давления ЦВД паровой турбины К-325-23,5;
- оценить газодинамическую эффективность предложенной конструкции с радиальным парораспределением.

---

## 4. Методы расчёта пространственных течений и проектирования проточных частей турбин

---

Для численного исследования пространственных течений использовался апробированный программный комплекс IPMFlow, являющийся развитием программ FlowER и FlowER-U.

Для проектирования проточных частей применен комплексный подход, использующий методы различных уровней сложности от одномерных до трёхмерных [14].

---

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

---

Прототипом объекта исследования является отсек ЦВД паровой турбины К-325-23,5, состоящий из регулирующей ступени, уравнительной камеры и первой ступени давления [11]. Рассматриваемые условия работы отсека представлены в табл. 1.

Проведенные ранее исследования [15, 16] показали наличие существенной окружной неравномерности в распределениях параметров потока в регулирующей ступени и уравнительной камере, а также перегруженности первого РК даже на номинальном режиме работы (режим № 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

Теоретическая схема регулирующей ступени с радиальным подводом пара к кольцевым камерам показана на рис. 1. В работе исследован вариант с тремя камерами.

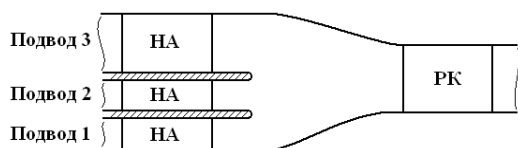


Рис. 1. Осевая ступень с радиальным парциальным подводом

Пар подаётся в кольцевые камеры лопаток соплового аппарата, разделённые по высоте перегородками, что обеспечивает равномерный по окружности подвод рабочего тела к РК. Последовательность работы регулирующей ступени для реализации режимов 1–3 следующая:

- открытие регулирующих клапанов в подводе 1 (режим № 3);
- открытие регулирующих клапанов в подводе 2 при открытых клапанах в подводе 1 (режим № 2);
- открытие регулирующих клапанов в подводе 3 при открытых клапанах в подводах 1 и 2 (режим № 1).

В случае применения подхода с радиальной парциальностью регулирующей ступени исчезает необходимость использования уравнительной камеры. При отсутствии УК регулирующая ступень выполняется со средним диаметром близким к диаметрам ступеней давлений, а для обеспечения срабатывания необходимого теплового перепада и более оптимальной нагрузки РС, дополнительно, на месте УК устанавливается еще одна ступень давления.

Основные геометрические характеристики и вид разработанного регулирующего отсека представлены в табл. 2 и рис. 2.

Лопатки ступеней регулирующего отсека цилиндрические. Для реализации частичных режимов с помощью радиальной парциальности лопатки НА1 выполнены с тремя кольцевыми областями со следующими высотами: 10,0 мм корневая, 6,7 мм средняя и 16,7 мм верхняя области. Рассмотрена упрощенная

постановка задачи без учёта реальной толщины кольцевых разделителей.

Таблица 2

Геометрические характеристики ступеней ЦВД паровой турбины

Параметр	НА1	РК1	НА2	РК2	НА3	РК3
$l/b$ (на $D_{cp}$ )	0,557	0,759	0,550	0,730	0,540	0,752
$D_{cp}$ , м	0,8675					
$t/b$ (на $D_{cp}$ )	1,135	1,148	1,262	0,911	1,262	0,911
$D/l$	25,97	25,97	27,02	27,02	26,21	26,21
Z, шт.	40	54	36	68	36	68
$\alpha_{1эф}$ , $\beta_{2эф}$ , градус (на $D_{cp}$ )	16,2	17,4	12,1	19,0	12,9	20,1

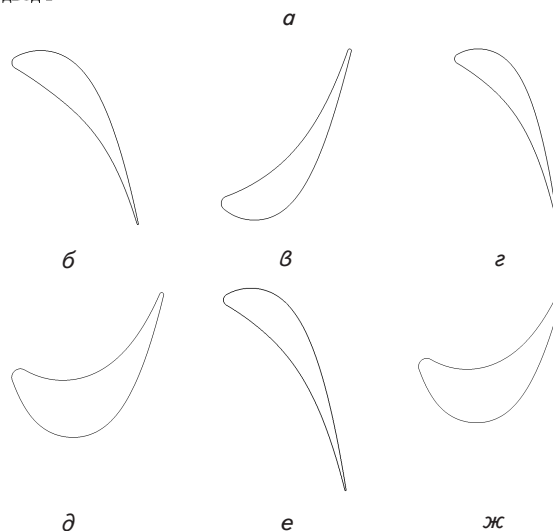
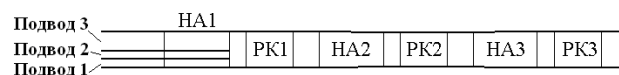


Рис. 2. Проточная часть первых трёх ступеней ЦВД паровой турбины: а – меридиональное сечение; б – НА 1-й ступени (НА1); в – РК 1-й ступени (РК1); г – НА 2-й ступени (НА2); д – РК 2-й ступени (РК2); е – НА 3-й ступени (НА3); ж – РК 3-й ступени (РК3)

### 6. Численные результаты моделирования потока в трёхступенчатом отсеке с радиальной парциальной ступенью

Для численного моделирования трёхступенчатый отсек с радиальной парциальной ступенью отображается на расчётную область с помощью структурированной сетки Н-типа с суммарным количеством ячеек 3,28 млн.

На рис. 3, 4 приведены графики распределений статического давления (P), изолинии скорости и проекции векторов скорости в среднем сечении каналов НА и РК регулирующей ступени для номинального режима. Наблюдается безотрывное обтекание и равномерная нагрузка лопаток ступени. Для элементов второй и третьей ступени существенных качественных отличий в структуре потока нет. На рис. 5 для всех режимов показана структура потока в среднем меридиональном сечении. В табл. 3 представлены интегральные характеристики отдельных ступеней и отсека в целом.

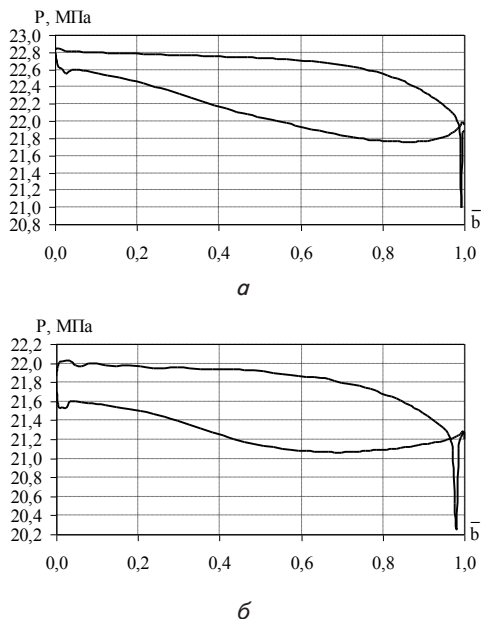


Рис. 3. Распределение статического давления на поверхностях лопаток: а – НА1; б – РК1

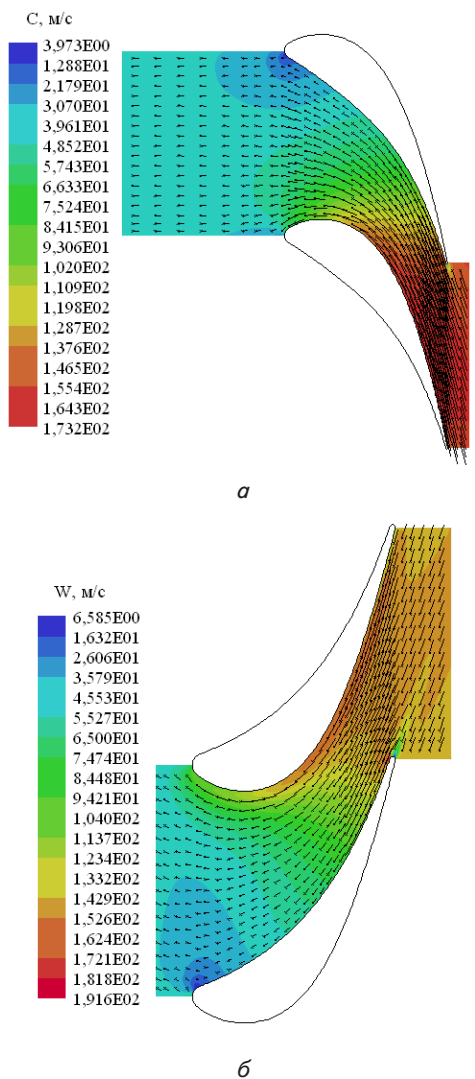


Рис. 4. Изолинии скорости и проекции векторов скорости: а – НА1; б – РК1

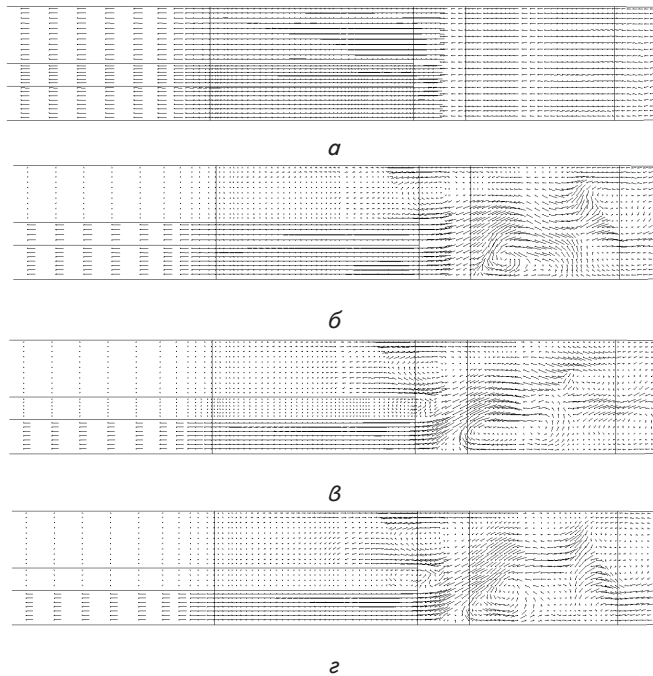


Рис. 5. Векторы скорости в среднем сечении канала 1-й ступени: а – Режим № 1; б – Режим № 2; в – Режим № 3; г – Режим № 4

Таблица 3  
Интегральные характеристики ступеней регулирующего отсека

Параметры	Режимы			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
$P_{0вх}$ , МПа	22,819	21,887	20,564	9,051
$T_{0вх}$ , К	808,802	806,597	811,192	748,004
1-я ступень				
$\alpha_{вых. потока}$ , градус	0,71	-10,61	12,51	3,39
$\xi_{1ст.}$ , %	4,058	27,347	49,041	49,352
$N_{1ст.}$ , МВт	5,839	10,472	8,82	4,253
$\eta_{1ст.}$ (по полн. параметрам), %	96,543	64,029	40,503	44,851
$\eta_{1ст.}$ (по статике), %	92,241	60,722	39,461	43,886
Реактивность ступени	0,42	0,175	0,079	0,086
2-я ступень				
$\alpha_{вых. потока}$ , градус	-0,82	-4,6	10,9	9,18
$\xi_{2ст.}$ , %	5,529	16,732	15,234	13,588
$N_{2ст.}$ , МВт	9,175	8,365	4,808	2,100
$\eta_{2ст.}$ (по полн. параметрам), %	94,605	88,133	88,308	89,251
$\eta_{2ст.}$ (по статике), %	90,934	84,275	84,913	85,999
Реактивность ступени	0,136	0,107	0,147	0,167
3-я ступень				
$\alpha_{вых. потока}$ , градус	8,16	0,31	18,49	19,94
$\xi_{3ст.}$ , %	7,211	8,997	5,451	10,775
$N_{3ст.}$ , МВт	8,755	8,508	4,601	2,052
$\eta_{3ст.}$ (по полн. параметрам), %	92,238	90,405	92,255	93,117
$\eta_{3ст.}$ (по статике), %	87,656	86,403	87,896	88,332
Реактивность ступени	0,122	0,106	0,157	0,164
Суммарные характеристики 3-х ступеней				
$\xi$ , %	5,879	19,572	36,137	36,819
$\xi_{ввых.ск.}$ , %	1,932	1,237	0,779	0,86
$N$ , МВт	23,769	27,345	18,229	8,405
$G$ , кг/с	277,754	243,551	165,112	73,306
$\eta$ (по полн. параметрам), %	94,209	78,336	57,777	60,860
$\eta$ (по статике), %	92,397	77,389	57,351	60,366

Из приведенных на рис. 5 проекций векторов скорости видно, что на частичных режимах из-за резкого расшире-



ния канала наблюдается образование отрыва в корневой зоне рабочего колеса первой ступени, а выравнивание потока начинается уже в каналах рабочего колеса.

Наибольшее влияние радиальной парциальности наблюдается в регулирующей ступени (табл. 3). При переходе к частичным режимам происходит резкое снижение КПД ступени. Суммарные характеристики трёх ступеней существенно зависят от характеристик первой ступени, что объясняет актуальность оценки влияния её геометрических параметров на газодинамическую эффективность. При этом ступень срабатывает большую часть перепада энтальпий, подведенного к отсеку. Значения абсолютного тангенциального угла на выходе из РК1 находятся в диапазоне  $\pm 13^\circ$ . Влияние частичного режима на эффективность 2-й и 3-й ступени проявляется в меньшей степени. Поток на выходе из РК последующих ступеней также близок к осевому. При этом значения тангенциального угла укладываются в диапазон от  $0^\circ$  до  $20^\circ$ .

## 7. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Предложен новый подход к организации парциального парораспределения – радиальное парораспределение, на основе которого разработан прототип регулирующего отсека для паровой турбины К-325-23,5 без уравнивательной камеры и с тремя кольцевыми камерами высотой 10,0 мм корневая, 6,7 мм средняя и 16,7 мм верхняя соответственно.

2. Установлено, что использование парораспределения с радиальной парциальностью обеспечивает необходимые параметры частичных режимов работы паровой турбины и обладает высокой газодинамической эффективностью на номинальном режиме.

3. Показано, что влияние радиальной парциальности на параметры газодинамической эффективности в большей мере проявляется в регулирующей ступени и существенно меньше во второй и третьей ступенях.

## Литература

1. Субботин, В. Г. Паровые турбины ОАО «Турбоатом» для тепловых электростанций [Текст] / В. Г. Субботин, Е. В. Левченко, В. Л. Швецов // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2009. – № 3. – С. 6–17.
2. Бойко, А. В. Численное исследование эффективности уравнивательной камеры за регулирующей ступенью на разных режимах работы [Текст] / А. В. Бойко, А. П. Усатый, Е. П. Авдеева // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2014. – № 1(1044). – С. 6–11.
3. Bohn, D. E. Experimental investigations into the non-uniform flow in a 4-stage turbine with special focus on the flow equalization in the first turbine stage [Text] / D. E. Bohn, H. H.-W. Funke // Proc. of ACME Turbo Expo 2003. Power for Land, Sea, and Air, 2003. – P. 1–9. doi: 10.1115/gt2003-38547
4. 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.
5. Narmin, B. H. Numerical analysis of partial admission in axial turbines [Text]: Doctoral Thesis Report / B. H. Narmin. – KTH Industrial Engineering and Management, 2010.
6. Бабаев, А. И. Применение комбинированной программы регулирования для турбоустановок большой мощности с сопловым парораспределением [Текст] / А. И. Бабаев, В. Н. Голошапов // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2015. – № 17(1126). – С. 75–80.
7. Moroz, L. Analysis and Optimization of Partial Admission Stages [Text] / L. Moroz, B. Frolov, O. Guriev. – The Asian Congress on Gas Turbines, 2014.
8. Бойко, А. В. Оценка влияния межвенцового зазора на эффективность регулирующей ступени на переменном режиме [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, А. П. Усатый, Е. П. Авдеева // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2012. – № 7. – С. 49–53.
9. Бирюков, А. В. Повышение эффективности работы парциального отсека паровой турбины с использованием физического и численного моделирования [Текст] / А. В. Бирюков, А. Н. Голушко, А. В. Осипов // Научно-технические ведомости СПб-ГПУ. – 2010. – № 3. – С. 40–45.
10. Гоголев, Г. И. Характеристики двухступенчатого отсека и его второй ступени при парциальном впуске первой ступени [Текст] / Г. И. Гоголев, А. М. Дроконов, В. В. Тарасов // Теплоэнергетика. 1983. – № 6. – С. 24–26.
11. 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.
12. Зарянкин, А. Е. Использование перфорированных экранов в камере регулирующей ступени паровой турбины с сопловым парораспределителем [Текст] / А. Е. Зарянкин, С. В. Арианов, В. А. Зарянкин, А. Н. Парамонов, О. М. Фичорьяк // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 1. – С. 10–15.
13. Kim, H. Prediction of unsteady loading on a steam turbine blade [Text] / H. Kim, H. Lee, D. Kim, S. T. Bose, D. A. Philips // Center for Turbulence Research. Proceedings of the Summer Program 2014, 2014. – P. 479–487.
14. Русанов, А. В. Метод аналитического профилирования лопаточных венцов проточных частей осевых турбин [Текст] / А. В. Русанов, Н. В. Пашенко, А. И. Косьянова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Т. 2, № 7(38). – С. 32–37.
15. 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. 90–95.
16. Русанов, А. В. Исследование структуры потока в регулирующем отсеке ЦВД паровой турбины К-325-23,5 на режиме парциальности 0.4 [Текст] / А. В. Русанов, А. И. Косьянова, Д. Ю. Косьянов // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 9/126. – С. 75–80.