

УДК 621.165:532.6

А.В. РУСАНОВ<sup>1</sup>, Е.В. ЛЕВЧЕНКО<sup>2</sup>, В.Л. ШВЕЦОВ<sup>2</sup>, Н.В. ПАЩЕНКО<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков<sup>2</sup>ВАТ "Турбоатом", Харьков, Украина

## ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛОПАТОК НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦНД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Представлены результаты численного исследования и анализ влияния сложного осевого и окружного навалов направляющих лопаток второй ступени ЦНД паровой турбины на газодинамические характеристики проточной части. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса FlowER. Показано, что для исследуемой проточной части ЦНД применение сложного навала направляющих лопаток в осевом направлении не приводит к улучшению газодинамических характеристик, в то время как окружной навал со стороны давления на сторону разрежения позволяет повысить внутренний КПД.

**Ключевые слова:** турбина, проточная часть, цилиндр низкого давления, пространственное профилирование, окружной навал лопаток, осевой навал лопаток, газодинамическое совершенствование

### Введение

Одним из главных требований, предъявляемым к новым и модернизируемым турбинам, является их высокая экономичность. Наиболее перспективным способом повышения эффективности турбомашин считается их газодинамическое усовершенствование за счет пространственного профилирования основных элементов проточных частей (лопаточных аппаратов и меридиональных обводов). Использование сложного навала (саблевидность и стреловидность), специальное профилирование меридиональных обводов и т.д. позволяют существенно повысить внутренний КПД турбомашин.

В статье представлены результаты численного исследования влияния пространственной формы направляющих лопаток второй ступени ЦНД паровой турбины на структуру течения и газодинамические характеристики проточной части.

### 1. Объект исследования. Методика проведения численного эксперимента

В качестве объекта исследования рассмотрены первые две ступени ЦНД паровой турбины, предложенной в работе [1] (рис. 1). Основные геометрические характеристики исследуемых ступеней приведены в табл. 1. В качестве граничных условий задавались полное давление  $P^* = 519$  кПа и температура пара  $T^* = 538$  К на входе и статическое давление  $P = 8,4$  кПа на выходе расчетной области (рис. 1, а). Физическая область отображается на расчетную с

использованием структурированной сетки Н-типа, с суммарным числом ячеек

$$N = 80 \times 72 \times (88 + 80) \times 2 = 1935360.$$

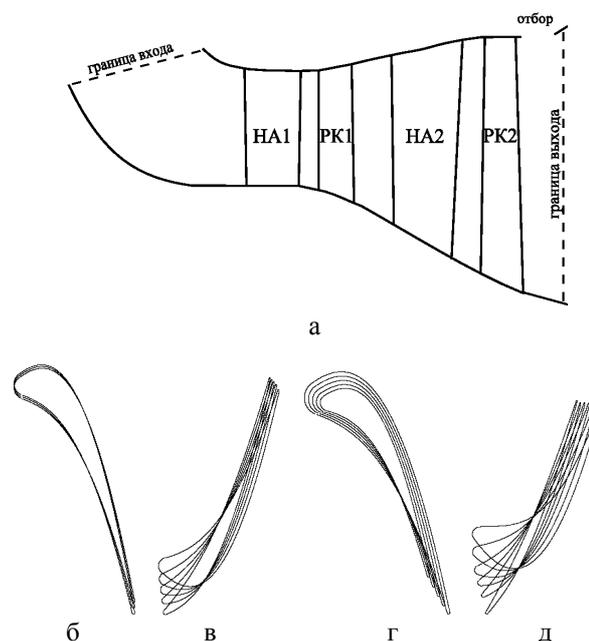


Рис. 1. Проточная часть ЦНД:  
а – меридиональное сечение;  
б – НА первой ступени; в – РК первой ступени;  
г – НА второй ступени; д – РК второй ступени

численное исследование выполнено с помощью программного комплекса FlowER [2, 3], который обеспечивает необходимую достоверность получаемых результатов как по качественной структу-

ре течения, так и по количественной оценке аэродинамических характеристик проточных частей турбомашин [4, 5].

Таблица 1  
Геометрические характеристики проточной части ЦНД паровой турбины

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

\* на среднем диаметре

Исследовались различные формы сложного навала лопаток НА второй ступени. Навал лопаток как в осевом, так и в окружном направлениях образовывался смещением сечений за счет придания оси лопатки формы кривой второго порядка, которая задается углами навалов  $\gamma$ ,  $\chi$  (для окружного и осевого направлений соответственно) и относительной длиной участка лопатки искривленной формы  $\bar{l}$  (рис. 2):

$$\bar{l}_{U,D} = \frac{l_{U,D}}{l} 100\%.$$

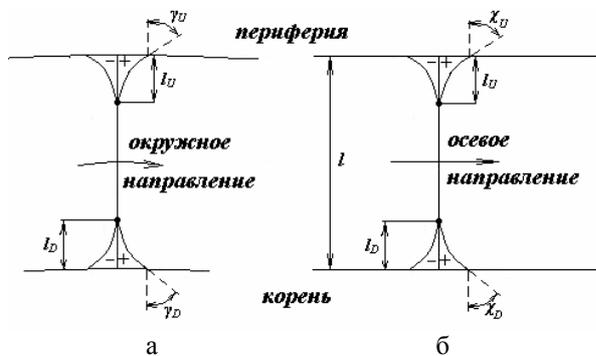


Рис. 2. Схема навала лопаток:  
а – окружной навал; б – осевой навал

## 2. Исследование влияния сложного окружного навала лопаток НА

Рассмотрено 18 вариантов конструкций проточной части низкого давления с различными формами сложного окружного навала лопаток НА второй ступени (на периферии –  $\bar{l}_U = 30\%$ ,  $40\%$ ,  $50\%$  и  $\gamma_U = -10^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ ; у корня –  $\bar{l}_D = 30\%$ ,  $40\%$ ,  $50\%$  и  $\gamma_D = -10^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ ). Для всех конструкций навал выполнялся со стороны давления на сторону разрежения.

Во всех исследованных проточных частях со сложным навалом направляющей лопатки в окружном направлении у корня потери кинетической энергии в средней части лопаточных венцов увеличиваются (рис. 3, а), а у корня уменьшаются. Как показано в работе [6], это связано, в основном, с перераспределением поля давлений.

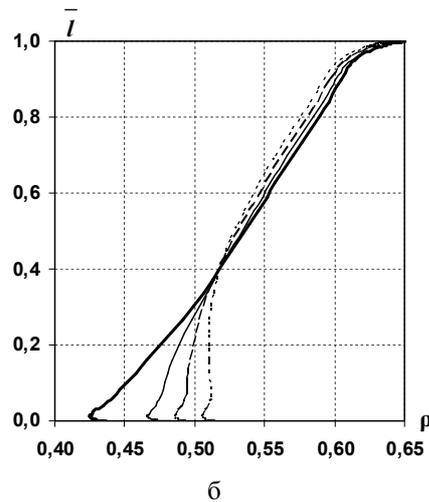
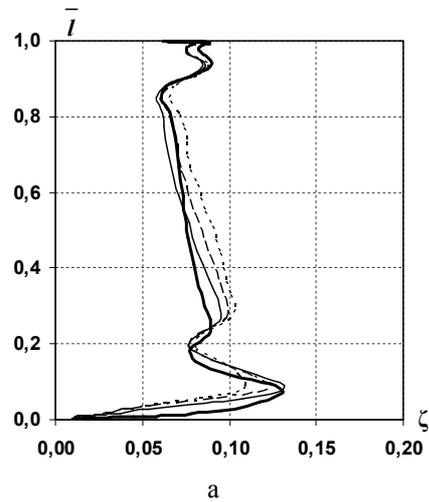


Рис. 3. Потери кинетической энергии (а) и реактивность (б) во второй ступени:  
— прямая лопатка; - - -  $\bar{l}_D = 50\%$ ,  $\gamma_D = -30^\circ$ ;  
- · -  $\bar{l}_D = 40\%$ ,  $\gamma_D = -30^\circ$ ; —  $\bar{l}_D = 30\%$ ,  $\gamma_D = -30^\circ$

Образовавшиеся дополнительные градиенты давления прижимают поток к обводам, за счет чего уменьшается интенсивность вторичных течений и повышается реактивность (рис. 3, б), и соответственно, уменьшаются потери кинетической энергии в прикорневой области. В средней части лопатки (в ядре потока) реактивность снижается, что приводит к увеличению потерь, причем, чем больше угол навала и длина участка лопатки искривленной формы, тем значительно возрастают потери. Суммарное снижение потерь кинетической энергии в ступени

достигается только для конструкций с малыми значениями  $\gamma_D$  и  $\bar{l}_D$ . В проведенном исследовании снижение потерь в ступени (на 0,13–0,21%) было получено для конструкций со следующими параметрами сложного навала направляющих лопаток в окружном направлении у корня:  $\bar{l}_D = 30\%$  с  $\gamma_D = -20^\circ$  и  $-30^\circ$ ;  $\bar{l}_D = 40\%$  с  $\gamma_D = -20^\circ$ .

Сложный навал направляющей лопатки второй ступени оказывает слабое влияние на распределение реактивности и потерь кинетической энергии в предшествующей (первой) ступени. В первой ступени реактивность увеличивается по всей высоте канала, а потери кинетической энергии снижаются на 0,01–0,05% (в зависимости от формы навала НА второй ступени). Также за счет изменения пространственной формы направляющей лопатки второй ступени происходит незначительное перераспределение располагаемых теплоперепадов между ступенями: с увеличением  $\gamma_D$  и  $\bar{l}_D$  мощность второй ступени снижается (на 0,03–0,21 МВт), а первой возрастает (на 0,02–0,22 МВт). Суммарная мощность двух ступеней изменяется незначительно. Наибольшее увеличение внутреннего КПД для двух ступеней получено в конструкции с  $\bar{l}_D = 30\%$  и  $\gamma_D = 30^\circ$  (+ 0,13%).

Расчеты конструкций с направляющими лопатками второй ступени со сложным навалом в окружном направлении на периферии показали, что в периферийной области за счет перераспределения поля давлений поток сильнее прижимается к обводу, повышается реактивность (рис. 4, б) и снижаются потери кинетической энергии (тем значительнее, чем больше увеличиваются  $\gamma_U$  и  $\bar{l}_U$ , рис. 4, а). В прикорневой области и средней части лопаток реактивность снижается, а характер распределения потерь кинетической энергии зависит от пространственной формы навала лопаток направляющего аппарата. Наибольшее снижение потерь кинетической энергии в ступени достигается для лопатки с навалом  $\bar{l}_U = 30\%$  и  $\gamma_U = -30^\circ$  (на 0,69%).

Для исследованных конструкций сложный навал направляющих лопаток второй ступени в окружном направлении на периферии не оказывает существенного влияния на характеристики предшествующей (первой) ступени. Также, как и в случае навала лопаток НА в окружном направлении у корня, наблюдается незначительное перераспределение срабатываемых тепловых перепадов между первой и второй ступенями, при этом суммарная мощность двух ступеней не изменяется.

Повышение внутреннего КПД двух ступеней (на 0,02–0,34%) имеет место в конструкциях с отно-

сительно небольшими участками лопатки искривленной формы ( $\bar{l}_U = 30\%$  и  $40\%$ ), а в конструкциях с  $\bar{l}_U = 50\%$  для всех рассмотренных углов навала КПД снижается. Наибольшее увеличение внутреннего КПД для двух ступеней получено в конструкции с  $\bar{l}_U = 30\%$ ,  $\gamma_U = -30^\circ$  (+ 0,34%).

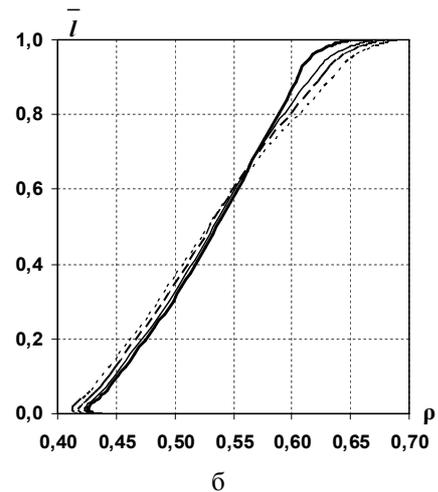
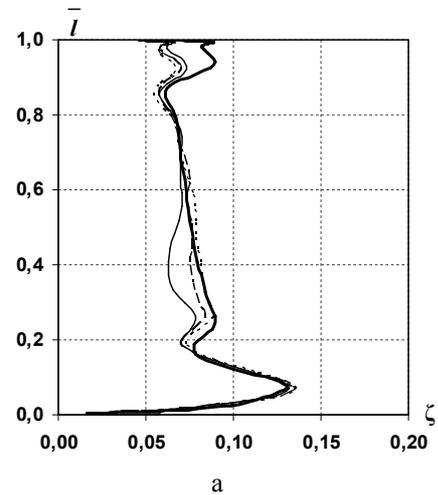


Рис. 4. Потери кинетической энергии (а) и реактивность (б) во второй ступени:  
 — прямая лопатка; - - -  $\bar{l}_U = 50\%$ ,  $\gamma_U = -30^\circ$ ;  
 - · -  $\bar{l}_U = 40\%$ ,  $\gamma_U = -30^\circ$ ; —  $\bar{l}_U = 30\%$ ,  $\gamma_U = -30^\circ$

### 3. Исследование влияния сложного осевого навала лопаток НА

Также, как и для окружного навала, рассмотрено 18 вариантов конструкций части низкого давления с различными формами сложного осевого навала лопаток НА второй ступени (на периферии —  $\bar{l}_U = 20\%$ ,  $30\%$ ,  $40\%$  и  $\chi_U = -10^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $-20^\circ$ ; у корня —  $\bar{l}_D = 20\%$ ,  $30\%$ ,  $40\%$  и  $\chi_D = -10^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ ). Для всех конструкций рассматривался осевой навал лопаток вверх по потоку.

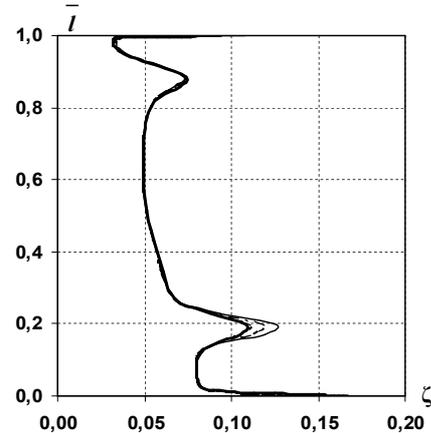
Во всех вариантах проточных частей ЦНД со сложным навалом направляющих лопаток второй ступени в осевом направлении в периферийной области увеличивается межвенцовый зазор и перераспределяется поле давлений, что приводит к уменьшению толщины пограничного слоя перед РК (поток сильнее прижимается к обводу) и, соответственно, к снижению потерь кинетической энергии. В средней части канала и прикорневых сечениях потери увеличиваются (рис. 5, б). Суммарные потери в ступени для всех исследованных конструкций увеличиваются на 0,06–0,2 %, причем возрастание потерь кинетической энергии тем значительнее, чем длиннее участок лопатки искривленной формы. Реактивность второй ступени меняется незначительно.

Сложный осевой навал направляющего аппарата второй ступени оказывает влияние на характеристики предшествующей ступени, в частности, на потери кинетической энергии в рабочем колесе первой ступени. Как видно из рис. 5, а, основные изменения происходят в прикорневых сечениях. Потери кинетической энергии в первой ступени  $\xi_{1ст}$  увеличиваются на 0,01–0,08 %.

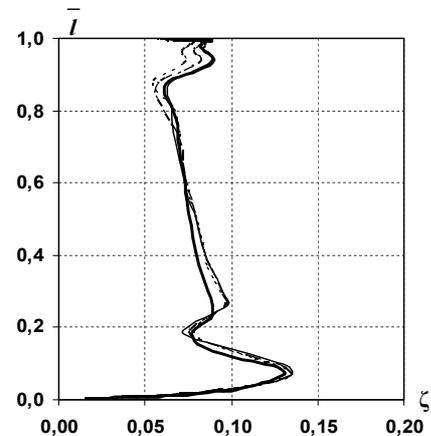
Суммарные интегральные характеристики двух ступеней для всех конструкций со сложным осевым навалом НА второй ступени на периферии, по сравнению с исходной проточной частью, несколько ухудшились: внутренний КПД понизился на 0,03–0,12 %, а мощность уменьшилась на 0,01–0,02 МВт.

Для всех рассмотренных проточных частей со сложным навалом направляющей лопатки у корня в осевом направлении наблюдается образование дополнительных градиентов давления в радиальном направлении, которые способствуют прижатию потока к корневому обводу (рис. 6, б, в). Как видно из рис. 6, в, при относительно больших значениях  $\chi_D$

и  $\bar{l}_D$  ( $\chi_D = -30^\circ$ ,  $\bar{l}_D = 30\%$ ) образуются скачки уплотнения у втулки на выходе из НА.



а



б

Рис. 5. Потери кинетической энергии: а – первая ступень; б – вторая ступень; — прямая лопатка; - - -  $\bar{l}_U = 20\%$ ,  $\chi_U = -20^\circ$ ; - · -  $\bar{l}_U = 30\%$ ,  $\chi_U = -20^\circ$ ; —  $\bar{l}_U = 40\%$ ,  $\chi_U = -20^\circ$

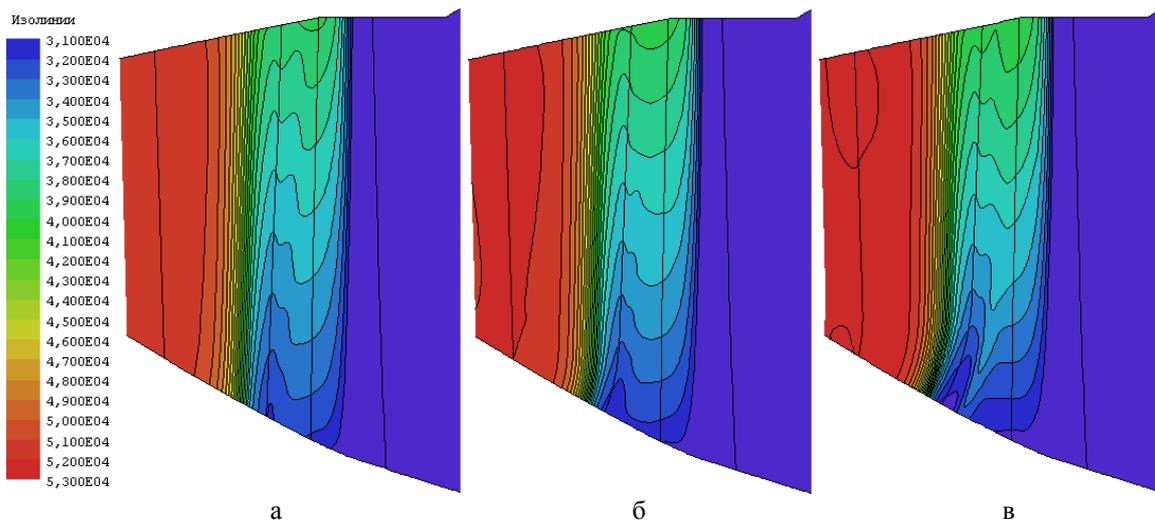


Рис. 6. Изолинии статического давления. Среднее меридиональное сечение межлопаточного канала: а – прямая лопатка; б –  $\bar{l}_D = 20\%$ ,  $\chi_D = -20^\circ$ ; в –  $\bar{l}_D = 30\%$ ,  $\chi_D = -30^\circ$

Таким образом, в зависимости от формы навала направляющей лопатки у корня в осевом направлении изменяются значения потерь кинетической энергии по всей длине лопатки (рис. 7, а). В средней части лопатки и на периферии потери возрастают, что связано с изменением угла натекания потока на лопатки рабочего колеса (абсолютный тангенциальный угол увеличивается с увеличением  $\chi_D$  и  $\bar{l}_D$ ).

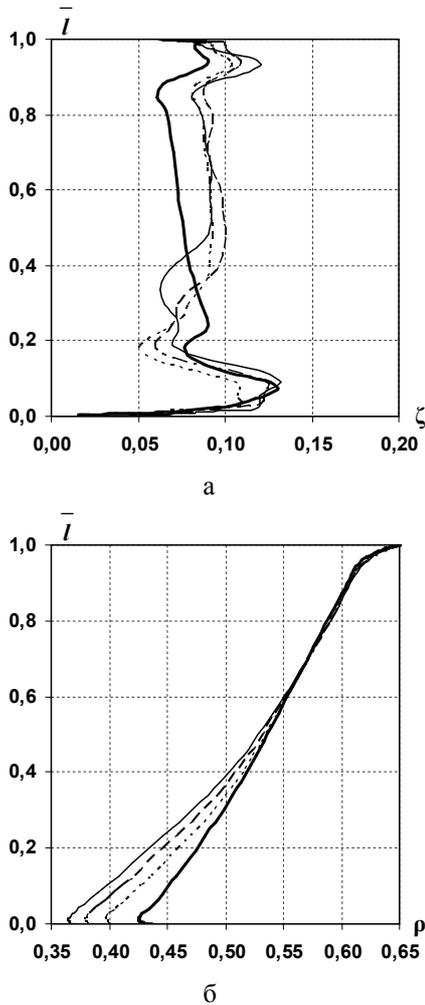


Рис. 7. Потери кинетической энергии (а) и реактивность (б) во второй ступени:

— прямая лопатка; - - -  $\bar{l}_D = 20\%$ ,  $\chi_D = -30^\circ$ ;  
 - · -  $\bar{l}_D = 30\%$ ,  $\chi_D = -30^\circ$ ; —  $\bar{l}_D = 40\%$ ,  $\chi_D = -30^\circ$

Наибольшие изменения реактивности ступени (рис. 7, б) наблюдаются в нижней половине лопатки, причем эти изменения тем значительнее, чем больше увеличиваются  $\chi_D$  и  $\bar{l}_D$ . В предшествующей (первой) ступени происходит незначительное снижение реактивности по всей высоте канала, что приводит к росту потерь кинетической энергии (на 0,01–0,13%). Мощность второй ступени возрастает с увеличением

$\chi_D$  и  $\bar{l}_D$  на 0,04–0,34 МВт, а первой снижается, что свидетельствует о перераспределении теплоперепадов между ступенями. Суммарная мощность двух ступеней снижается на 0,02–0,09 МВт (в зависимости от формы навала НА).

### Заключение

Выполнено численное исследование влияния сложного осевого и окружного навалов направляющих лопаток второй ступени на интегральные характеристики и структуру потока проточной части ЦНД, в результате которых установлено:

– при изменении пространственной формы направляющей лопатки второй ступени происходит перераспределение тепловых перепадов между ступенями;

– сложный окружной навал направляющих лопаток второй ступени, выполненный со стороны давления на сторону разрежения, в конструкциях с относительно небольшими участками лопатки искривленной формы (как у корня, так и на периферии) приводит к повышению внутреннего КПД двух ступеней; наибольшее увеличение внутреннего КПД для двух ступеней получено в конструкциях с относительной длиной участка лопатки искривленной формы 30% и углом навала  $-30^\circ$  (у корня  $+0,13\%$  и на периферии  $+0,34\%$ );

– для исследуемого ЦНД применение сложного осевого навала НА второй ступени против потока (как у корня, так и на периферии) не привело к улучшению газодинамических характеристик проточной части.

### Литература

1. Русанов А.В. Повышение аэродинамической эффективности проточной части ЦНД паровой турбины мощностью 200 МВт / А.В. Русанов, Н.В. Пащенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 78-83.
2. Свідомство про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовінцевих турбомашиних "FlowER" / С.В.Єришов, А.В.Русанов. – 19.02.1996.
3. 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.
4. 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 Lodzka, Lodz, Poland. – 2002. – № 122. – P. 63-70.

5. Хомылев С.А. Численное исследование обтекания турбинных решеток профилей: Ч. 1. Верификация расчетного метода / С.А. Хомылев, С.Б. Резник,

С.В. Еришов // Энерг. и теплотехн. процессы и оборудование. – 2008. – № 6. – С. 23-31.

6. Русанов А.В. Влияние сложного осевого навала лопаток ЦВД паровой турбины на структуру пространственного потока / А.В. Русанов, Ю.П. Волков // Пробл. машиностроения. – 2008. – № 2. – С. 8-14.

Поступила в редакцию 31.05.2010

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

### ВПЛИВ ПРОСТОРОВОГО ПРОФІЛЮВАННЯ НАПРАВЛЯЮЧИХ ЛОПАТОК НА ГАЗОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦНТ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ

*А.В. Русанов, Є.В. Левченко, В.Л. Швецов, Н.В. Пащенко*

Наведено результати чисельного дослідження та аналізу впливу складного осевого та колового навалів направляючих лопаток другого ступеня ЦНТ парової турбіни на газодинамічні характеристики проточної частини. Розрахунки виконано з допомогою програмного комплексу FlowER. Показано, що для досліджуваної проточної частини ЦНТ використання складного навалу направляючих лопаток в осьовому напрямку не приводить до покращення газодинамічних характеристик, у той час як коловий навал з боку тиску на сторону розрідження дозволяє підвищити внутрішній ККД.

**Ключові слова:** турбіна, проточна частина, циліндр низького тиску, просторове профілювання, коловий навал лопаток, осьовий навал лопаток, газодинамічне удосконалення.

### INFLUENCE OF SPATIAL PROFILING OF THE STATOR BLADES UPON THE GAS DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE LOW-PRESSURE CYLINDER OF STEAM TURBINE

*A.V. Rusanov, E.V. Levchenko, V.L. Shvetsov, N.V. Paschenko*

The results of numeral research of influence and analysis of compound lean and sweep of the stator blades of second stage low-pressure cylinder of the steam turbine upon the gas dynamic characteristics of flowpath are presented. Calculations carry out with the use of the software FlowER. It is shown that for researching flowpath of the low-pressure cylinder application of compound lean of the stator blades does not lead to improvement of gas-dynamic characteristics, while the sweep from the pressure on the vacuum side improves internal EFFICIENCY.

**Key words:** turbine, flowpart, low-pressure cylinder, spatial profiling, blades lean, blades sweep, gas dynamic improvement.

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

**Левченко Евгений Владимирович** – канд. техн. наук., генеральный конструктор ВАТ "Турбоатом", Харьков, Украина, e-mail: inform@turboatom.com.ua.

**Швецов Виктор Леонидович** – главный конструктор паровых и газовых турбин ВАТ "Турбоатом", Харьков, Украина, e-mail: inform@turboatom.com.ua.

**Пащенко Наталья Викторовна** – ведущий инженер ИПМаш НАН Украины, Харьков, Украина.