

УДК 621.165

А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.; зав. каф. НТУ «ХПИ»;
А. П. УСАТЫЙ, д-р техн. наук, с.н.с.; с.н.с. НТУ «ХПИ»;
Д. И. МАКСЮТА, м.н.с. НТУ «ХПИ»

РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ СТУПЕНИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ

В статье приведен комплексный метод оптимизации ступени осевой турбины, объединяющая в себе одномерную и трехмерную оптимизацию. Представлен алгоритм оптимизационного процесса. По разработанной методике выполнена оптимизация ступени осевой турбины для различных радиальных зазоров. В результате оптимизации заметно повышен КПД изолированной ступени. Сделан анализ причин увеличения эффективности.

Ключевые слова: разработка методики оптимизации, турбинная ступень, одномерная оптимизация, трехмерная оптимизация, периферийная протечка, закон закрутки, входной геометрический угол лопатки.

Введение

Разработка методов пространственной оптимизации ступеней осевых турбин представляет большой интерес для энергетической отрасли. При этом, применение вычислительной аэродинамики (*CFD*) позволяет не только решить оптимизационную задачу с высокой точностью, но и получить более детальную картину течения рабочего тела в ступени. Вместе с тем, оптимизация с использованием *CFD* требует значительных временных ресурсов для выполнения расчетов.

В то же время, оптимизацию турбинной ступени в одномерной или двумерной постановке возможно выполнить существенно быстрее. Недостатком использования методов одномерной и двумерной теории для решения оптимизационных задач является менее детальный учет сложных физических явлений, имеющих место в турбинной ступени, а также применение эмпирических зависимостей для оценки основных видов потерь энергии в ступени, что снижает точность и достоверность получаемых результатов.

Очевидно, что для устранения выше перечисленных недостатков целесообразно использовать комплексный подход, основанный на применении одномерной и трехмерной теорий для решения задач оптимального проектирования турбинных ступеней.

В данной статье представлены результаты разработки и апробации комплексного метода оптимизации ступени осевой турбины, который основан на итерационном процессе поочередного применения методов одномерной и трехмерной оптимизаций.

Постановка задачи

Ранее в работе [1] авторами был разработан метод пространственной оптимизации ступени осевой турбины с учетом обтекания турбинных профилей и периферийной протечки. Данный метод позволил выбрать оптимальную закрутку лопаток учитывая характер трехмерного течения в канале с протечками. Кроме того, была отработана методика изменения профиля рабочей решетки для обеспечения безударного натекания по всей высоте лопатки. Однако, разработанный метод не позволяет влиять на степень реактивности на среднем радиусе, а лишь перераспределяет градиент реактивности по высоте канала. Этот недостаток ограни-

© А.В. Бойко, А.П. Усатый, Д.И. Максютя, 2015

чивает диапазон применения данного оптимизационного подхода.

При оптимизации уже существующей турбинной ступени необходимо сохранять параметры рабочего тела на входе и выходе, а также массовый расход. При этих ограничениях изменение степени реактивности на среднем радиусе возможно с использованием двух параметров: эффективных углов выхода потока из направляющей и рабочей решеток (α_{13} и β_{23} соответственно). Для определения оптимальных значений углов α_{13} и β_{23} на среднем радиусе целесообразно использовать хорошо разработанную одномерную теорию оптимизации турбинной ступени [2].

Объектом исследования была выбрана модельная (исходная) турбинная ступень – прототип 3-й ступени ЦВД паровой турбины K500-65/3000. В сопловой решетке используется профиль ТС-1А, в рабочей – профиль активного типа Р2. Граничные условия: $P_0^* = 145500$ Па, $T_0^* = 387$ °К, $P_2 = 100300$ Па, рабочее тело – воздух. Указанным граничным условиям соответствует дозвуковое истечение во всей ступени (числа Маха не превышают $M = 0,78$). Плоскость замера параметров в расчетах располагалась: в межвенцовом зазоре – на расстоянии 1 мм от сопловых решеток; в выхлопном патрубке – на расстоянии 16 мм от выходной кромки рабочей решетки.

Параметры исходной ступени указаны в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры исходной ступени

Параметр	Сопловый аппарат	Рабочее колесо
Средний диаметр (d_{cp})	353 мм	353 мм
Хорда (b)	21,83 мм	16 мм
Угол установки (α_v и β_v)	55,1806°	13,17°
Эффективный угол (α_{13} и β_{23})	13,1167°	21,2439°
Относительный шаг (t/b)	0,747	0,722
Относительная длина (l/b)	1,145	1,69
Число лопаток (z)	68	96
Высота лопаток (l)	25 мм	27 мм
Обороты ротора (n)	8145 об/мин	
Межвенцовый зазор (δ)	4 мм	
Радиальный зазор (d_{rc})	0,5 мм	

Цель исследования – создание метода оптимизации ступени осевой турбины, а также качественный и количественный анализ результатов оптимизации.

Варьируемые параметры – эффективные углы выхода потока из сопловой и рабочей лопатки на среднем радиусе (1D оптимизация) и законы закрутки лопаточных венцов (3D оптимизация).

Оптимизационный алгоритм базируется на итерационном процессе (рис. 2), на каждом шаге которого целевая функция заменяется соответствующей ей формальной макромоделью (ФММ) повышенной точности [3]. Для создания высокоточной ФММ применяется теория планирования эксперимента [4] и кубическая сплайн-интерполяция [5]. Поиск оптимального решения осуществляется с использованием ЛП_т – последовательности [6].

Для выполнения трехмерных расчетов была создана расчетная область, которая соответствует одному сегменту отмеченной выше исходной модельной ступени (рис. 1). Ее верификационные расчеты подтвердили хорошее совпадение результатов численного расчета и натурального эксперимента [7].

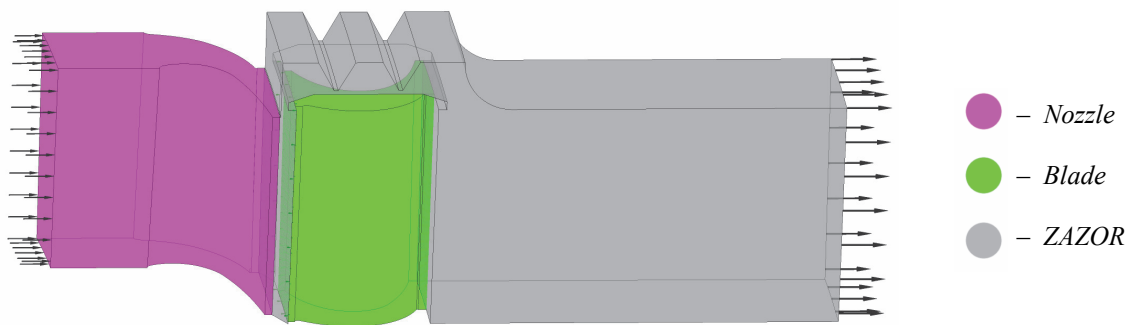


Рис. 1 – Общий вид расчетной области

Для получения данных о вязком течении в турбинной решетке численно решалась система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, расчетная схема TVD второго порядка аппроксимации с локально первым в местах высоких градиентов. Все расчеты проводились в трехмерной постановке. Расчетная сетка для направляющей решетки (*Nozzle*) составила $180 \times 98 \times 90$ элементов, для рабочей решетки (*Blade*) $120 \times 98 \times 90$ элементов. Сеточные модели для сопловой и рабочей лопаток были построены в программе *TOpGrid*, разработанной на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ» (автор к.т.н. Говорущенко Ю.Н.). Домен *ZAZOR* в общей сложности состоял из 2,2 млн. элементов. Модель турбулентности – $k-\omega$ SST.

Алгоритм оптимизации

На первом этапе, в соответствии с блок-схемой алгоритма оптимизации (рис. 2) выполняется 3D расчет исходной ступени. Этот расчет служит базовой точкой для начала процесса оптимизации.

Далее, решается задача одномерной оптимизации эффективных углов выхода из сопловой и рабочей решеток [2], которую можно записать в виде:

$$\max_{\alpha_{13}, \beta_{23}} \eta_u = \frac{N_c}{GH_0}, \quad (1)$$

где N_c – действительная мощность ступени; G – массовый расход воздуха через ступень; H_0 – располагаемый теплоперепад ступени.

Для решения этой задачи используется одномерная модель течения рабочего тела в турбинной ступени, которая позволяет с достаточной точностью оценить реальные физические процессы в проточной части. Модель учитывает потери энергии в сопловых и рабочих решетках, потери от утечек в диафрагменные и надбандажные уплотнения, ротационные потери, потери от влажности и др. Это является гарантией построения высокоточной ФММ целевой функции и получения достоверных результатов одномерной оптимизации.

Поиск оптимальных значений α_{13} и β_{23} выполняется при заданном массовом расходе и обеспечении безударного натекания потока на рабочую решетку (т.е. $\beta_1 = \beta_{1r}$). Значения параметров на входе и выходе из ступени, а также массовый расход при этом, соответствуют данным из 3D расчета исходной ступени. Распределение параметров потока по высоте выполняется в соответствии с законом $c_u R = \text{const}$.

На основании полученных результатов одномерной оптимизации (α_{13} , β_{23} , β_{1r}) перестраиваются лопаточные венцы 3D модели исходной турбинной ступени. При этом сопловый аппарат перестраивается только путем изменения угла установки его профиля до получения необходимого значения эффективного угла выхода потока. В рабочей решетке осуществлялось как изменение угла установки профиля, так и

соответствующее перепрофилирование с целью получения необходимого геометрического угла входа β_{1r} [8], обеспечивающего безударное натекание на рабочую лопатку на среднем радиусе.



Рис. 2 – Алгоритм оптимизационного процесса

Далее в соответствии с рис. 2 выполняется 3D расчет новой ступени. Одним из основных и обязательных условий процесса оптимизации является обеспечение постоянства массового расхода рабочего тела в 3D расчетах на всех итерациях. Синхронизация результатов одномерной оптимизации с проверочным 3D расчетом оптимальной ступени осуществляется методом последовательных приближений, что обеспечивает выполнение этого условия.

На следующем этапе алгоритма оптимизации выполняется поиск оптимальных законов закрутки сопловой и рабочей лопаток. В общем виде задача трехмерной оптимизации записывается в виде:

$$\max_{m_1, m_2} \eta_u = \frac{N_c}{GH_0}. \quad (2)$$

Для варьирования законами закрутки лопаточных венцов используются следующие зависимости:

$$r_1^{m_1} \operatorname{ctg} \alpha_y = \operatorname{const}, \quad r_2^{m_2} \operatorname{ctg} \beta_y = \operatorname{const}, \quad (3)$$

где r_1 и r_2 – радиусы направляющей и рабочей решеток, соответственно; α_y и β_y – углы установки направляющей и рабочей решетки на данном радиусе; m_1 и m_2 – варьируемые параметры направляющей и рабочей решеток, соответственно.

Параметры m_1 и m_2 характеризуют градиенты углов закрутки. При $m > 0$ углы установки возрастают к периферии (прямая закрутка), а при $m < 0$ – уменьшаются (обратная закрутка) [9].

После получения оптимальных значений m_1 и m_2 , строятся новые профили и выполняется проверочный трехмерный расчет. Если разница между КПД в трехмерном расчете и КПД, спрогнозированным в формальной макромодели, отличается более чем на 0,05 % в относительных величинах, то такая формальная макромодель считается недостаточно точной. В этом случае центр области поиска оптимума смещается в точку оптимума, полученную на предыдущей итерации, а границы области соответствующим образом сужаются, что позволяет повысить точность ФММ функции цели. Этот процесс повторяется до тех пор, пока точность формальной макромодели не достигнет необходимого уровня. После, оптимизация считается законченной (рис. 2).

Следует отметить, что применение метода планирования эксперимента к решению трехмерных аэродинамических задач ранее было использовано в [10]. Однако, в работе [10], в расчетах участвовал только сопловый аппарат. Данные исследования являются развитием предыдущих и, предназначены для оптимизации турбинных ступеней.

Расчётное исследование

В рамках поставленной задачи была проведена оптимизация исходной модельной ступени с двумя различными радиальными зазорами: 0,5 мм и 1,0 мм, что при переходе к безразмерным величинам равняется относительным зазорам $1,416 \cdot 10^{-3}$ и $2,833 \cdot 10^{-3}$ соответственно (зазор, отнесенный к среднему диаметру ступени).

Для обеих величин радиальных зазоров, разработанный алгоритм показал стабильную тенденцию к увеличению КПД как в одномерной, так и в трехмерной оптимизации. Интегральные результаты оптимизации сведены в таблице 2.

На рис. 3–6 индексы «исх», «опт1d», «опт3d» относятся к исходной, 1D-оптимальной и 3D-оптимальной ступени соответственно.

Как видно из табл. 2, КПД ступени в одномерной оптимизации возрастает за счет снижения потерь в ступени на сопловой, рабочей решетке и с выходной скоростью. Это достигается оптимальным выбором степени реактивности на среднем

радиусе путем нахождения на среднем радиусе оптимальных значений $\alpha_{1э}$ и $\beta_{2э}$. Одномерная оптимизация также позволяет определить на среднем радиусе геометрический угол входа на рабочую лопатку $\beta_{1г}$, что в свою очередь дает возможность создать постоянный по высоте профиль рабочей лопатки, обеспечивающий близкое к безударному обтекание его на среднем радиусе. При этом утечка рабочего тела в радиальный зазор все же увеличивается, что связано с увеличением степени реактивности на среднем радиусе.

Таблица 2.

Интегральные результаты оптимизации

Параметр	Единицы измерения	радиальный зазор 0,5 мм			радиальный зазор 1,0 мм		
		Исходная ступень	1D опт	3D опт	Исходная ступень	1D опт	3D опт
Расход (G)	кг/сек	1,69124	1,69092	1,6966	1,69814	1,69477	1,69528
Утечка (G_y/G)	%	2,84282	3,13956	3,06663	4,69505	5,20685	5,22641
КПД	%	85,2853	85,6713	85,8485	83,5276	83,72	83,8823
Степень реактивности	%	16,6299	20,9394	19,6755	15,3663	19,2274	18,945
Потери энергии							
Потери в сопле	%	3,36044	3,23021	3,27286	3,41383	3,30993	3,31457
Потери в лопатке	%	7,4315	6,45622	6,31233	7,48852	6,49993	6,40794
Потери с вых. ск.	%	5,09899	4,84515	4,83709	5,70348	5,44881	5,37071
Геометрия							
$\alpha_{1э}$	град	13,1167	13,41	–	13,1167	13,36	–
$\beta_{2э}$	град	21,2439	20,17	–	21,2439	20,17	–
$\beta_{1г}$	град	37,4112	32,99	–	37,4112	32,55	–
m_1	–	–	–	0,664108	–	–	0,425232
m_2	–	–	–	1,851486	–	–	1,822223

С увеличением радиального зазора наблюдается тенденция к уменьшению степени реактивности на среднем радиусе (рис. 3, рис. 5), что в свою очередь влияет на уменьшение протечек через увеличенный радиальный зазор. Кроме того, 3D оптимизация позволяет найти законы закрутки направляющего и рабочего колес, обеспечивающие некоторое выравнивание степени реактивности по высоте ступени (рис. 3, рис. 5). Последнее, в сочетании с уменьшением степени реактивности на среднем радиусе, также ведет к уменьшению протечек через радиальный надбандажный зазор.

Значение выбора оптимального закона закрутки по высоте лопатки в трехмерной оптимизации показано на рис. 4 и рис. 6. В одномерной оптимизации, как было отмечено ранее, близкое к безударному обтеканию рабочего профиля мы имеем только на среднем радиусе. Поскольку рабочая лопатка остается цилиндрической, изменение параметров потока в межвенцовом зазоре по высоте лопатки связано с появлением значительных углов атаки в корневой и периферийной части рабочей лопатки.

Оптимизация в 3D постановке позволяет определить оптимальные законы закрутки лопаточных венцов и нормализовать удар по всей высоте рабочей решетки.

Применение разработанного алгоритма оптимизации позволило увеличить КПД ступени на 0,5632 % в абсолютных величинах при радиальном зазоре 0,5 мм и на 0,3547 % при радиальном зазоре 1,0 мм.

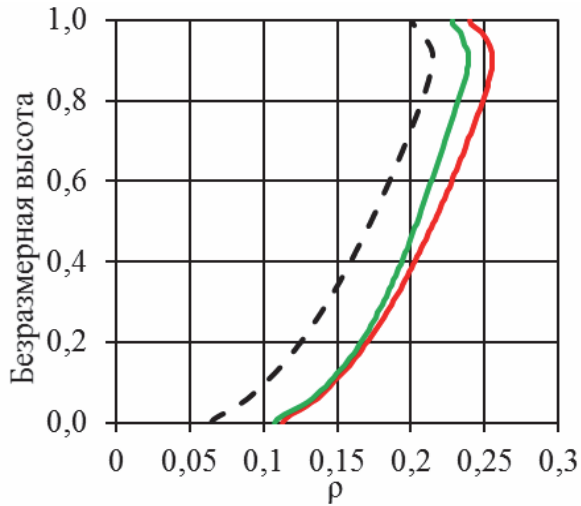


Рис. 3 – Распределение по высоте ступени степени реактивности ($\delta = 0,5$ мм)

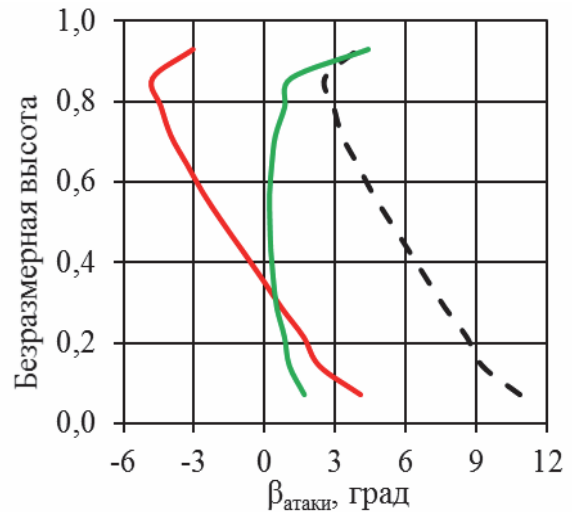


Рис. 4 – Распределение по высоте ступени угла атаки потока на рабочей решетке ($\delta = 0,5$ мм)

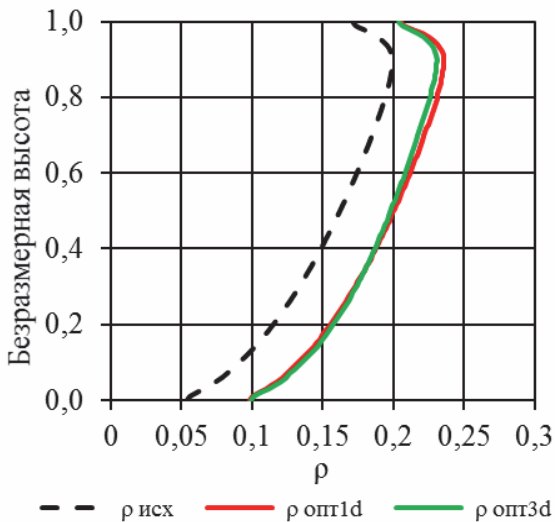


Рис. 5 – Распределение по высоте ступени степени реактивности ($\delta = 1,0$ мм)

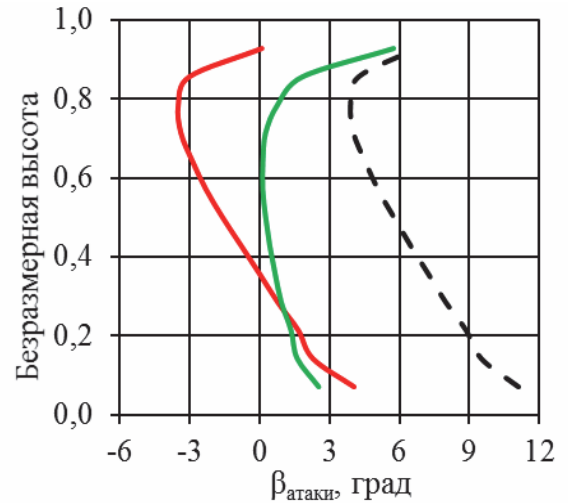


Рис. 6 – Распределение по высоте ступени угла атаки потока на рабочей решетке ($\delta = 1,0$ мм)

Следует отметить, что приведенный выше анализ результатов оптимизации одинаково справедлив как для радиального зазора 0,5 мм, так и для зазора 1,0 мм. Это свидетельствует о высокой точности разработанного метода и его применимости для широкого диапазона конструкций турбинных ступеней.

Выводы

1) Предложен комплексный метод оптимизации ступени осевой турбины, который основан на итерационном процессе поочередного применения методов одномерной и трехмерной оптимизаций, что позволяет, значительно экономя машинное время, достичь поставленной цели.

2) Получены две оптимальные ступени с различными величинами радиальных зазоров, КПД которых существенно выше исходных.

Список литературы: 1. *Бойко, А. В.* Метод пространственной оптимизации ступени осевой турбины с учетом обтекания турбинных профилей и периферийной протечки [Текст] / А. В. Бойко, Д. И. Максютя // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 12(1055). – С. 5–11. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. 2. *Бойко, А. В.* Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбин [Текст]: [Учеб. пособие для вузов по спец. «Турбостроение»] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко. – Харьков : Вища шк., Изд-во при ХГУ, 1989. – 217 с., С. 141–156. 3. *Бойко, А. В.* Повышение точности формальной макромодели при планировании эксперимента [Текст] / А. В. Бойко, А. П. Усатый, В. С. Баранник // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПІ» : сб. науч. трудов. – Харьков : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 5. – С. 51–54. – ISSN 2078-774X. 4. *Rechtschaffner, R. L.* Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs [Text] / R. L. Rechtschaffner // *Technometrics*. – 1967. – Vol. 9. – P. 569–575. 5. *Самарский, А. А.* Численные методы [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М. : Наука ; Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с., С. 140–143. – ISBN 5-02-013996-3. 6. *Соболь, И. М.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст] / И. М. Соболь, Р. Б. Статников. – М. : Наука, 1981. 7. *Бойко, А. В.* Верификация численного расчета работы ступени осевой турбины с учетом периферийной протечки [Текст] / А. В. Бойко, Д. И. Максютя // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПІ» : сб. науч. трудов. – Харьков : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 13. – С. 18–23. – ISSN 2078-774X. 8. *Бойко, А. В.* Численный расчет влияния удара на рабочую лопатку при работе в ступени [Текст] / А. В. Бойко, М. В. Бурлака, Д. И. Максютя // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПІ» : сб. науч. трудов. – Харьков : НТУ «ХПІ». – 2012. – № 7. – С. 24–28. – ISSN 2078-774X. 9. *Говорущенко, Ю. Н.* Оптимизация газодинамических и геометрических характеристик осевой турбинной установки [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.12 / Юрий Николаевич Говорущенко. – Харьков : Политехнический институт им. В.И. Ленина, 1981. – 175 с. 10. *Бойко, А. В.* Численное исследование влияния сложного тангенциального навала на характеристики кольцевой реактивной турбинной решетки [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, А. П. Усатый, М. В. Бурлака // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПІ» : сб. науч. трудов. – Харьков : НТУ «ХПІ». – 2009. – № 3. – С. 18–22. – ISSN 2078-774X.

Bibliography (transliterated): 1. Boiko, A. V., and D. I. Maksyuta. "Metod prostranstvennoj optimizacii stupeni osevoj turbiny s uchetom obtekanija turbinyh profilej i periferijnoj protechki." *Visnyk NTU "KhPI" Ser.: Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja*. No. 12(1055). Kharkiv : NTU "HPI", 2014. 5–11. ISSN 2078-774X. Print. 2. Boiko, A. V., and Ju. N. Govorushhenko. *Osnovy teorii optimal'nogo proektirovanija protochnoj chasti osevyh turbin. Ucheb. posobie dlja vuzov po spec. "Turbostroenie"*. Kharkov : Vyshha shkola, Izd-vo pri KhGU, 1989. 141–156. Print. 3. Boiko, A. V., A. P. Usatyj and V. S. Barannik. "Povyshenie tochnosti formal'noj makromodeli pri planirovanii jeksperimenta." *Vestnik NTU "KhPI". Ser.: Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie*. No. 5. Kharkov : NTU "KhPI". 2013. 51–54. ISSN 2078-774X. Print. 4. Rechtschaffner, R. L. "Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs." *Technometrics*. Vol. 9. 1967. 569–575. Print. 5. Samarskij, A. A., and A. V. Gulin. *Chislennye metody. Ucheb. posobie dlja vuzov*. Moscow : Nauka, 1989. 140–143. ISBN 5-02-013996-3. Print. 6. Sobol', I. M., and R. B. Statnikov. *Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami*. Moscow : Nauka, 1981. Print. 7. Boiko, A. V., and D. I. Maksyuta. "Verifikacija chislennogo rascheta raboty stupeni osevoj turbiny s uchetom periferijnoj protechki." *Vestnik NTU "KhPI". Ser.: Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie*. No. 13. Kharkov: NTU "KhPI". 2013. 18–23. ISSN 2078-774X. Print. 8. Boiko, A. V., M. V. Burlaka and D. I. Maksyuta. "Chislennyj raschet vlijanija udara na rabochuju lopatku pri rabote v stupeni." *Vestnik NTU "KhPI". Ser.: Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie*. No. 7. Kharkov: NTU "KhPI". 2012. 24–28. ISSN 2078-774X. Print. 9. Govorushchenko, Yu. N. *Optimizacija gazodinamicheskij i geometricheskij harakteristik osevojturbinnoj ustanovki. Dis. ... kand. tehn. nauk*. Kharkov, 1981. Print. 10. Boiko, A. V., et al. "Chislennoe issledovanie vlijanija slozhnogo tangencial'nogo navala na harakteristiki kol'cevoj reaktivnoj turbinnoj reshetki." *Vestnik NTU "KhPI". Ser.: Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie*. No. 3. Kharkov: NTU "KhPI". 2009. 18–22. ISSN 2078-774X. Print.

Поступила (received) 04.02.2015