

А.В. Русанов, д.т.н., заместитель директора по научной работе, А.Л. Шубенко, д.т.н., член-корреспондент НАН Украины, зав. отделом «Оптимизации процессов и конструкций турбомашин», Н.В. Пашенко, к.т.н., м.н.с., А.В. Сенецкий, к.т.н., н.с. (Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина), Р.А. Русанов, аспирант (Институт проточных машин им. Р. Шевальского Польской академии наук, Гданьск, Польша)

Разработка проточной части паровой теплофикационной турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01

Представлены результаты расчетов трехмерных течений в проточной части паровой турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01. Проточная часть паровой турбины спроектирована с использованием метода параметризации и аналитического профилирования лопаток, а также методов моделирования пространственных вязких течений, реализованных в программном комплексе IPMFlow. Показано, что в разработанной турбине за счет применения современных профилей достигнуты хорошие газодинамические характеристики.

Ключевые слова: проточная часть, паровая турбина, численные исследования, пространственное течение.

Представлено результати розрахунків тривимірних течій у проточній частині парової турбіни Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01. Проточна частина парової турбіни спроектована з використанням методу параметризації і аналітичного профілювання лопаток, а також методів моделювання просторових вязких течій, реалізованих у програмному комплексі IPMFlow. Показано, що в розробленій турбіні за рахунок застосування сучасних профілів досягнуто добрі газодинамічні характеристики.

Ключові слова: проточна частина, парова турбіна, чисельні дослідження, просторова течія.

Presented the results of calculations of three-dimensional flows in the flow part of the steam turbine Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01. The flow part of the steam turbine is designed using the method of parameterization and analytical profiling of blades, and methods of spatial modeling of viscous flows, implemented in the software package IPMFlow. It is shown that in the developed turbine achieved good gas-dynamic characteristics through the use of modern profiles.

Keywords: flow part, steam turbine, numerical investigations, spatial flow.

Введение

В последние 15-20 лет при проектировании проточных частей турбомашин широко применяются методы моделирования пространственных вязких течений, основанные на численном интегрировании уравнений Рейнольдса [1, 2, 3 и др.]. Их применение необходимо для обеспечения высокого уровня аэродинамического совершенствования турбоустановок, уменьшения объема экспериментальных исследований и сокращения времени проектирования. На данный момент трехмерные методы расчета используются как поверочные.

В ИПМаш НАН Украины разработан комплексный подход к проектированию проточных частей турбин, основанный на математических моделях различных уровней сложности (от одномерных до трехмерных), а также методах параметризации и аналитического профилирования лопаточных венцов, в котором базовые профили описываются кривыми четвертого и пятого порядков с применением условия обеспечения минимального значения максимальной кривизны.

В статье представлена проточная часть турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01, спроектированная с использованием программного комплекса IPMFlow, предназначенного для расчета пространственных вязких течений.

Объект исследования. Турбина Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01

На рис. 1 представлен чертеж прототипа проточной части турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01, а в табл. 1 приведены основные технические характеристики, которые должны обеспечивать турбина на но-

минальном режиме. Проектирование прототипа выполнено на основе одномерных тепловых расчетов и атласа стандартных профилей ЛМЗ.

Одним из главных требований, выдвигаемых к данной турбине, являлось обеспечение низкой металлоемкости изделия, для чего были увеличена окружная скорость вращения ротора и повышена нагруженность ступеней.

Метод расчета течения

Численные исследования пространственных течений пара в проточной части турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01 проводились с использованием программного комплекса IPMFlow, который является развитием программ FlowER и FlowER-U [3, 4]. Математическая модель комплекса основана на численном интегрировании осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса с использованием неявной квазимонотонной ENO-схемы повышенной точности и двухпараметрической дифференциальной модели турбулентности SST Ментера [5]. Результаты расчетов, полученные с помощью программного комплекса IPMFlow, обладают необходимой достоверностью как по качественной структуре течения, так и по количественной оценке характеристик изолированных турбинных решеток и проточных частей турбомашин в целом [6, 7].

Метод аналитического профилирования проточных частей осевого типа

Для построения геометрии лопаточных венцов проточной части осевой турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01 использовался метод параметризации и аналитического профилирования лопатки [8].

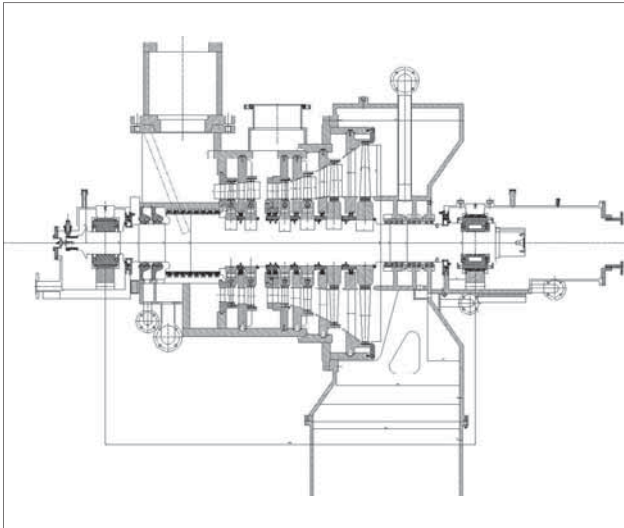


Рис. 1. Продольный разрез турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01

Лопатки направляющих и рабочих колес задаются произвольным набором плоских профилей, каждый из которых рассматривается в декартовой системе координат с осью абсцисс, параллельной оси турбины, и осью ординат, совпадающей с фронтом решетки (рис. 2). Для задания решетки профилей исходными данными являются: b_x – ширина профиля; α_1 – скелетный угол решетки на входе; t – шаг решетки; α_{2ef} – эффективный угол выхода потока; r_1 – радиус входной кромки; r_2 – радиус выходной кромки; $\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2$ – углы «заострения» входной и выходной кромок; $\alpha_{2ск}$ – угол «скоса» спинки, $\alpha_{co} = \alpha_{2s} + \alpha_{2ск}$; $1_{сп}, 2_{сп}, 1_{кор}, 2_{кор}$ – точки сопряжения входных и выходных кромок с кривыми спинки и корытца.

Профиль описывается входной и выходной кромками, а также кривыми спинки и корытца. Входная и выходная кромки являются окружностями, а кривые спинки – многочленами 5-го порядка, корытца – многочленами 4-го порядка вида:

$$y(x) = \sum_{i=0}^5 a_i x^i, a_i = \text{const}; \quad (1)$$

$$y(x) = \sum_{i=0}^4 a_i x^i, a_i = \text{const}. \quad (2)$$

Коэффициенты кривой (1), описывающей спинку, рассчитываются итерационно из соотношений

$$\begin{cases} y'_{сп}(x_{1сп}) = \text{tg}(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) \\ y''_{сп}(x_{1сп}) = \{y''_{сп,0}\} \\ y_{сп}(x_0) = y_0 \\ y'_{сп}(x_0) = \text{tg}(\alpha_{co}) \\ y_{сп}(x_{2сп}) = y_{2сп} \\ y'_{сп}(x_{2сп}) = \text{tg}\{\alpha_{2s}\} \end{cases}, \quad (3)$$

где $x_{1сп}, y_{1сп}, x_{2сп}, y_{2сп}$ – координаты точек касания кривой корытца с окружностями входной и выходной кро-

мок, которые определяются по заданному углу $\alpha_1 - \Delta\alpha_1$ на входной кромке и варьируемому углу $\alpha_{2с}$ на выходной кромке.

Варьируемыми параметрами для соотношений (3) являются α_{2s} и $y''_{сп,0}$, подбор которых должен обеспечить заданную величину горла решетки O , а также удовлетворить требованию минимального значения максимальной кривизны на множестве кривых (1) [9]. Величина горла определяется по заданным значениям шага решетки и эффективному углу $O = t \cos \alpha_{2ef}$.

После определения кривой спинки и вписывания входной и выходной кромок итерационно рассчитываются коэффициенты кривой (2) для корытца с использованием соотношений

$$\begin{cases} y_{кор}(x_{1кор}) = y_{1кор} \\ y'_{кор}(x_{1кор}) = \text{tg}(\alpha_1 - \Delta\alpha_1) \\ y''_{кор}(x_{1кор}) = \{y''_{кор,0}\} \\ y_{кор}(x_{2кор}) = y_{2кор} \\ y'_{кор}(x_{2кор}) = \text{tg}\alpha_{2с} \end{cases}, \quad (4)$$

Угол $\alpha_{2с}$ выбирается в интервале α_{co} и α_{2s} таким образом, чтобы обеспечить минимальное значение максимальной кривизны кривой корытца [9], либо задается равным $\alpha_{2s} - \Delta\alpha_2$.

Численный анализ газодинамической эффективности проточной части турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01

С учетом требований к расходным и геометрическим характеристикам (число ступеней, расход пара, средние диаметры ступеней, количество и высоты

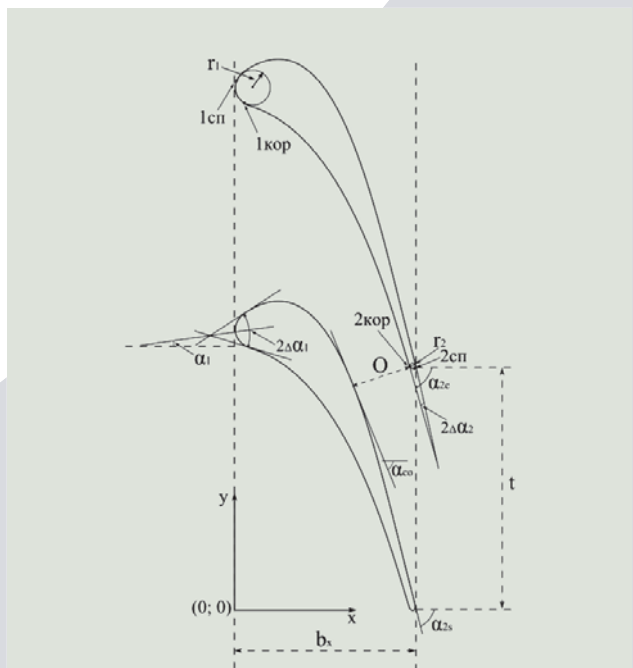


Рис. 2. Решетка профилей

Таблица 1. Основные параметры турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01 на номинальном режиме

Наименование	Единицы измерения	Значение
Частота вращения ротора турбины	об/мин	6000
Расход пара на входе	т/ч	53,5
Давление пара на входе	ата	5
Температура пара на входе	°С	230
Давление в конденсаторе (вакуум)	ата	0,098
Давление в отборе	ата	2,2
Температура в отборе	°С	155,9
Расход пара в отбор	т/ч	15
Расход пара в конденсатор	т/ч	38

лопаток) были проведены следующие этапы исследования:

- предварительный одномерный тепловой расчет турбины;
- выполнены численные исследования пространственных течений на режиме при $G_0=53,5$ т/ч с теплофикационным отбором $G_{омб}=15$ т/ч и получены характеристики лопаточных аппаратов проточной части проектируемой турбины;
- оценены величины утечек через зазоры в периферийной части лопаток и междисковых пространствах, а также термодинамические параметры вытекающего и втекающего в них пара (схема учета надбандажных и междисковых перетечек, а также отборов пара представлена на рис. 3);
- проведен анализ полученных численных результатов.

Расчеты проводились на разностных сетках с числом узлов в одном межлопаточном канале около 450 тысяч.

В качестве граничных условий задавались на входе в ступень полное давление и энтальпия, а на выходе – статическое давление, а также величины расходов пара в междисковых пространствах направляющих аппаратов (НА) и надбандажных протечках рабочих колес (РК) и отборах. Величина массового расхода в межлопаточных трактах не задается, а получается в результате расчета.

На рис. 4-6 представлены вид меридиональной проекции проточной части турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01, трехмерная визуализация и наборы профилей лопаток, полученные с помощью описанного выше метода параметризации и аналитического профилирования лопаточных венцов.

В табл. 2 представлены основные интегральные газодинамические характеристики и показатели эффективности работы проточной части турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01, полученные по результатам проведенных численных исследований пространственных течений.

Суммарная мощность, полученная при расчете, составила 6097 кВт.

Суммарный КПД проточной части рассчитывался по формуле:

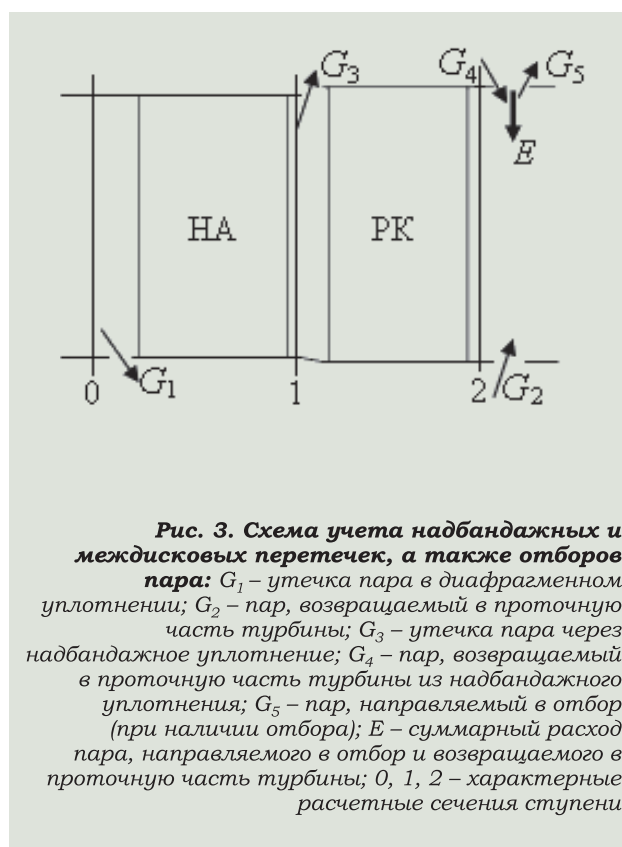


Рис. 3. Схема учета надбандажных и междисковых перетечек, а также отборов пара: G_1 – утечка пара в диафрагменном уплотнении; G_2 – пар, возвращаемый в проточную часть турбины; G_3 – утечка пара через надбандажное уплотнение; G_4 – пар, возвращаемый в проточную часть турбины из надбандажного уплотнения; G_5 – пар, направляемый в отбор (при наличии отбора); E – суммарный расход пара, направляемого в отбор и возвращаемого в проточную часть турбины; 0, 1, 2 – характерные расчетные сечения ступени

$$\eta_i = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{\sum_{i=1}^n G_i H''_{ад i}}, \quad (5)$$

где $H''_{ад}$ – адиабатический тепловой перепад, полученный по разности полной (заторможенной) энтальпии на входе и статической на выходе, G_i – массовый расход пара.



Рис. 4. Меридиональная проекция проточной части турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01

По формуле (5) КПД проточной части с учетом потерь от влажности и с выходной скоростью составил 83,02 %.

По результатам проведенных численных исследований можно сделать вывод, что уровень газодинамического совершенства профилей и выбор основных геометрических характеристик ступеней с учетом поставленных конструктивных ограничений в целом достаточно хороший.

Выводы

Представлена геометрия проточной части паровой турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01, спроектированная с использованием нового метода параметризации и аналитического профилирования лопаток. Анализ результатов расчетов трехмерных течений в проточной части турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01 показал, что в разработанной турбине за счет применения современных профилей достигнут относительно высокий уровень газодинамического совершенства.

Список литературы:

1. ANSYS Products / ANSYS, Inc. All Rights Reserved. Terms & Conditions [Internet source]. – Available from: <http://www.ansys.com>

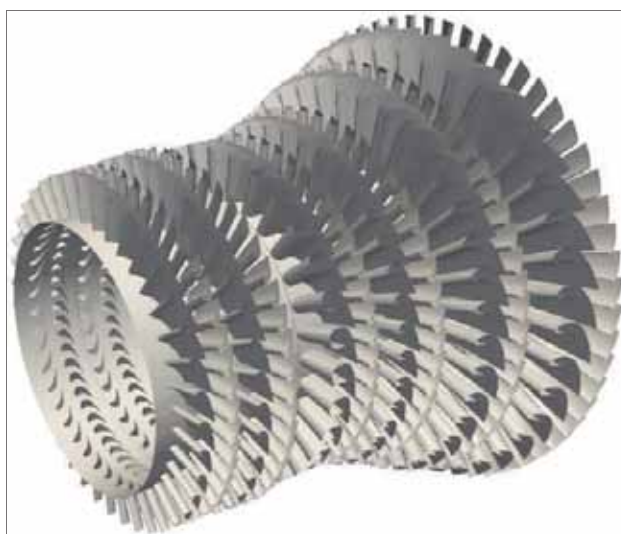


Рис. 5. Трехмерное изображение турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01

Таблица 2. Основные газодинамические характеристики проточной части турбины Т-3.3/5.5-0.5/0.22/0.01 по результатам 3D расчетов

Параметр	Ступень						Проточная часть
	1	2	3	4	5	6	
$G_{\text{вых}}$, кг/с	14,89	10,67*	10,44	10,41	10,63	10,54	–
$P_{\text{вых}}$, Па	330061	221114	136344	70932	35747	9964	–
$T_{\text{вых}}$, °C	191,5	158,3	126,0	90,1	73,0	45,5	–
X	1	1	1	0,984	0,9847	0,9168	–
C_2 , м/с	78,0	98,7	131,6	153,7	158,3	302,1	–
ρ , %	28,5	22,8	30,4	24,7	34,96	50,76	–
α , °	12,75	12,96	13,28	13,85	15,91	19,62	–
β , °	17,4	18,93	18,51	19,57	20,26	29,51	–
φ , %	97,51	96,46	97,25	96,22	96,82	96,43	–
ψ , %	96,55	94,87	96,4	95,93	97,76	97,79	–
$\xi_{\text{см}}$, %	6,26	9,00	7,10	8,77	5,895	5,715	–
$\eta_{\text{от}}$, %	89,63	88,95	88,60	83,30	89,29	81,89	83,02
$N_{\text{см}}$, Вт	862859	1049920	824601	985968	1038701	1334916	6096965
$H_{\text{ад}}$	67450	82969	96750	123889	121029	177202	669289

* – в соответствии со схемой расчета отбор рассчитывается со второй ступенью

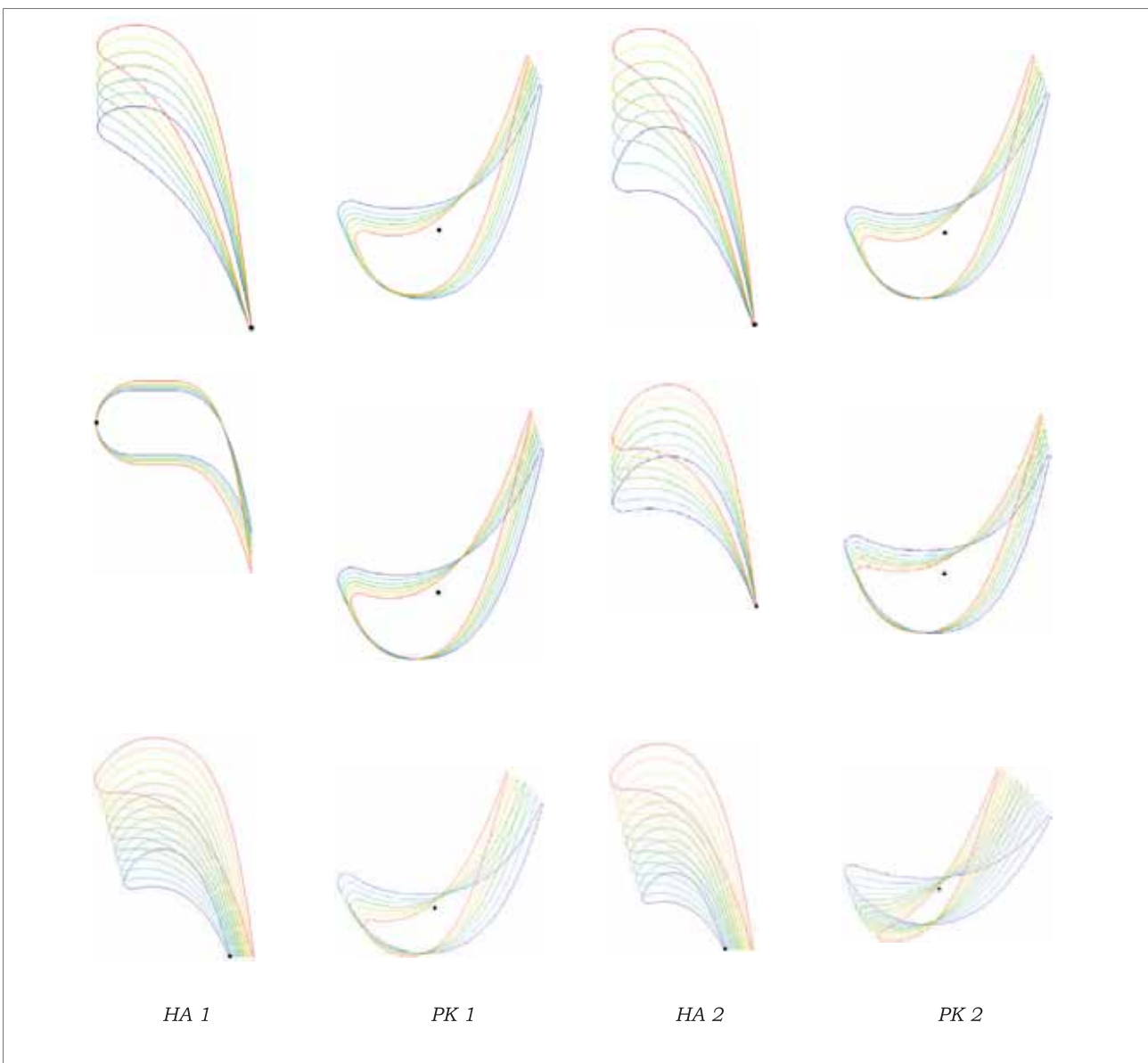


Рис. 6. Профили направляющих и рабочих лопаток

2. FlowVision / FlowVision: The Lean Business & Supply Chain Consulting Group [Internet source]. – Available from: <http://www.flowvision.com>

3. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовінцевих турбомашинах «FlowER» [Текст] / С. В. Єршов, А. В. Русанов. – Державне агентство України з авторських та суміжних прав, ПА № 77; 19.02.96. – 1 с.

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

5. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications [Text] // AIAA J. – 1994. – 32, №8. – P. 1598–1605.

6. Lampart P. Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases [Text] / P. Lampart, S. Yershov, A. Rusanov // International conference

SYMKOM'02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery, Politechnika Lodzka, Lodz, Poland. – 2002. – No. 122. – P. 63–70.

7. Хомылев С.А. Численное исследование обтекания турбинных решеток профилей: часть 1 – верификация расчетного метода [Текст] / С.А. Хомылев, С.Б. Резник, С.В. Ершов // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – № 6. – С. 23–31.

8. Русанов А.В. Метод аналитического профилирования лопаточных венцов проточных частей осевых турбин [Текст] / А.В. Русанов, Н.В. Пащенко, А.И. Косьянова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 2/7(38). – С. 32–37.

9. Бойко А.В. Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбомашин [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко. – Х.: Вища школа, 1989. – 217 с.