

УДК 621.165:51.380

А.В. РУСАНОВ¹, С.В. ЕРШОВ¹, Б.В. ИСАКОВ², В.Е. СПИЦЫН², А.А. УСАТЕНКО²¹ ООО «FlowER», Харьков, Украина

Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАНУ, Харьков, Украина

² ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ ГТД НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ ТРЕХМЕРНОГО ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ. ЧАСТЬ 2. ПЕРЕХОДНЫЙ ДИФфуЗОР И СТУПЕНЬ СИЛОВОЙ ТУРБИНЫ

Рассмотрено влияние изменения конструкции турбины низкого давления на ее работу совместно с переходным диффузором и первой ступенью силовой турбины. Выполнена модификация конструкции переходника и силовой турбины под новые условия работы. Исследование проведено с помощью программного комплекса *FlowER-U*[®].

проточная часть, турбины, численное моделирование, уравнения Навье-Стокса, трехмерное вязкое течение, дифференциальная модель турбулентности

Введение

На основе опыта накопленного в энергетическом машиностроении созданы эмпирические методики, позволяющие проектировать проточные части турбомашин с удовлетворительным уровнем аэродинамической эффективности [1, 2]. Однако, для дальнейшего повышения аэродинамического КПД необходима доводка, учитывающая индивидуальные особенности разрабатываемой конструкции. В последнее время, с этой целью, все больше используется численный эксперимент, основанный на решении уравнений Навье-Стокса [3, 4]. К сожалению, его использование для массовых сквозных расчетов проточных частей турбомашин целиком, ограничено из-за недостаточных мощностей вычислительной техники. Поэтому, в основном проводятся численные исследования отдельных элементов конструкций, таких как, например, ступень, выходное устройство и т.д. Но, изменение одного узла может повлечь изменение условий работы других частей проточного тракта, что в свою очередь, может привести к обратному влиянию. Поэтому, после изменения, какого либо элемента, необходима проверка работы проточной части целиком и, возможно, адаптация к новым условиям работы. В настоящей работе рассмотрено влияние изменения конструкции турбины

низкого давления (ТНД) на ее работу совместно с переходным диффузором (переходник) и первой ступенью силовой турбины (СТ). Выполнена модернизация конструкции переходника и силовой турбины под новые условия работы. Исследование проведено с помощью программного комплекса *FlowER-U*[®].

1. Численный метод и программа расчета трехмерного вязкого течения в турбомашине

Для выполнения газодинамических расчетов вязкого трехмерного потока использовался программный комплекс *FlowER-U*[®], включающий следующие модули:

- *MultiStage* – предназначен для расчетов вязкого трехмерного потока в многоступенчатой турбомашине (разработан по технологии *FlowER*[®] [5]);
- *OptiStage* – предназначен для оптимизации турбинных ступеней с использованием модуля *MultiStage* (разработан по технологии *Optimus* [6]);
- *TotalFlow* – предназначен для расчетов трехмерных вязких течений многокомпонентного газа в областях произвольной формы [7].

Течение газа описывается осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса. Моделирова-

ние турбулентности осуществляется с помощью дифференциальной двухпараметрической модели Ментера (SST) [8]. Свойства рабочего тела описываются уравнениями состояния совершенного газа, Таммана и Ван-дер-Ваальса с постоянными либо переменными теплоемкостями. Исходные уравнения решаются численно неявной ENO схемой второго порядка аппроксимации [9]. Комплекс позволяет учитывать выдувы охлаждающего воздуха с поверхностей меридиональных обводов и лопаток, надбандажные, диафрагменные протечки и течение в радиальном зазоре. Программные модули комплекса написаны на алгоритмическом языке Fortran-90.

2. Основные характеристики исследуемой турбины

В работе рассмотрены три проточные части, каждая из которых состояла из ТНД, переходного диффузора и 1-й ступени СТ. Проточная часть № 1 является исходной, прототипом для которой служит реально существующий ГТД. В проточной части № 2 используется модифицированная ТНД [10]. В проточной части № 3 применена ТНД такая же, как и в проточной части № 2 и модифицированные переходный диффузор и 1-я ступень СТ (модификации описаны в разделе 3). Меридиональные проекции исследуемых проточных частей показаны на рис. 1. Переходной диффузор содержит 9 стоек разных размеров – 6 силовых стоек и 3 обтекателя. Циклически повторяющаяся часть переходника показана на рис. 2. На рис. 3 показаны плоские сечения лопаток соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК) исходной и модифицированной 1-х ступеней СТ. Расчеты проводились при следующих условиях:

- полное давление на входе (среднее) – 8,128 [атм];
- полная температура на входе (средняя) – 1205 [K];

- тангенциальный угол натекания потока на входе (средний, отсчитывается от осевого направления) – 27,5 [град];
- статическое давление на выходе (среднее) – 2,872 [атм];
- частота вращения РК ТНД – 7280 [об/мин];
- частота вращения РК 1-й ступени СТ – 3700 [об/мин].

Кроме того, в ТНД выдувается охлаждающий воздух, доля которого составляет около 3,5% от массового расхода на входе.

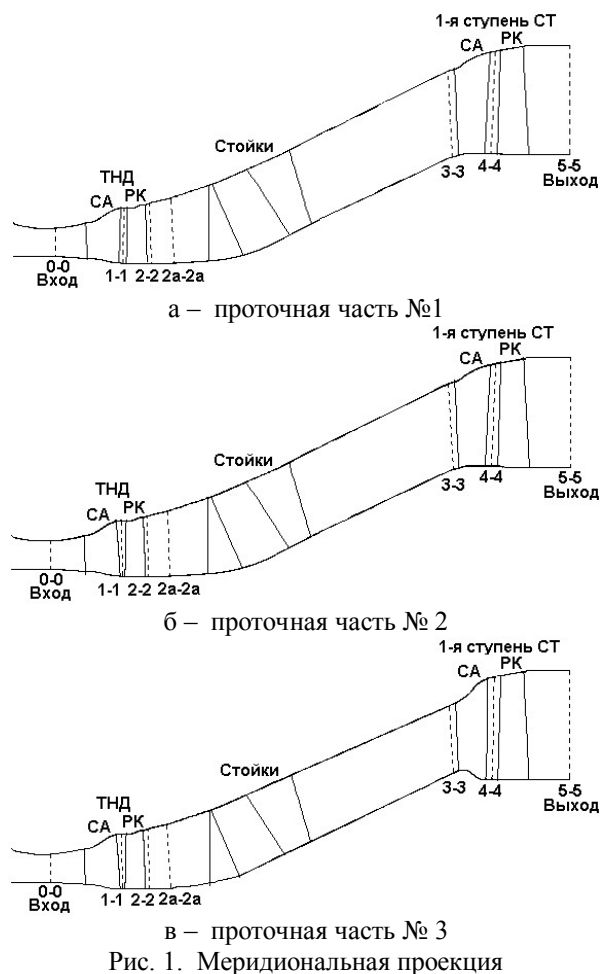


Рис. 1. Меридиональная проекция

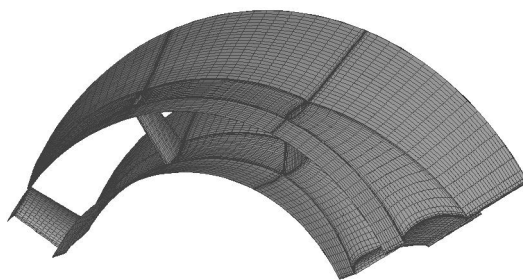


Рис. 2. Переходной диффузор

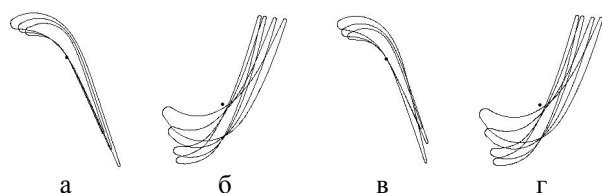


Рис. 3. 1-я ступень СТ; а, в – СА; б, г – РК; а, б – исходная конструкция; в, г – модифицированная конструкция

3. Численные результаты

Первой задачей исследования являлась проверка совместной работы ТНД, переходного диффузора и 1-й ступени СТ в конструкции с модифицированным ТНД (проточная часть № 2) по сравнению с исходной (проточная часть № 1). На рис. 4 и 5 показана визуализация течения в переходных диффузорах проточных частей № 1 и № 2. Изолинии чисел Маха представлены в двух плоскостях – развертка тангенциальной поверхности в сечении 75% высоты стоек, и в поперечном сечении за выходными кромками стоек. Векторы скорости показаны в меридиональной плоскости в сечении между «тонкими» стойками на расстоянии 8% шага от рабочей поверхности стойки. Видно, что в переходном диффузоре исходной конструкции отрывные зоны существенно меньше, чем в проточной части с модифицированным ТНД. Это связано с увеличением отклонения от осевого направления угла выхода потока из ТНД в проточной части № 2. Однако, несмотря на это, потери кинетической энергии в переходнике, между сечениями 2а и 3 (рис. 1), в рассматриваемых проточных частях близки (табл. 1). По-видимому, это объясняется с одной стороны, малым вкладом переходника в суммарные потери из-за относительно небольшого теплового перепада на нем, а с другой стороны, существенной неравномерностью потока (в радиальном направлении) за ТНД в исходном варианте. Неравномерность потока и малая реактивность у корня за ТНД в проточной части № 1 приводят к значительным потерям кинетической энергии на участке перемешивания потока между сечениями 2 и 2а (рис. 1).

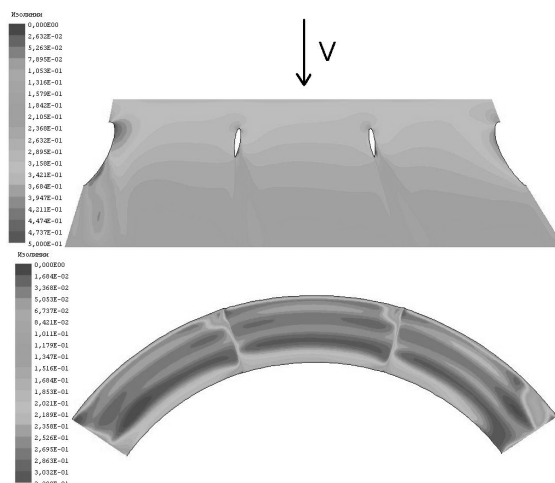


Рис. 4. Проточная часть № 1

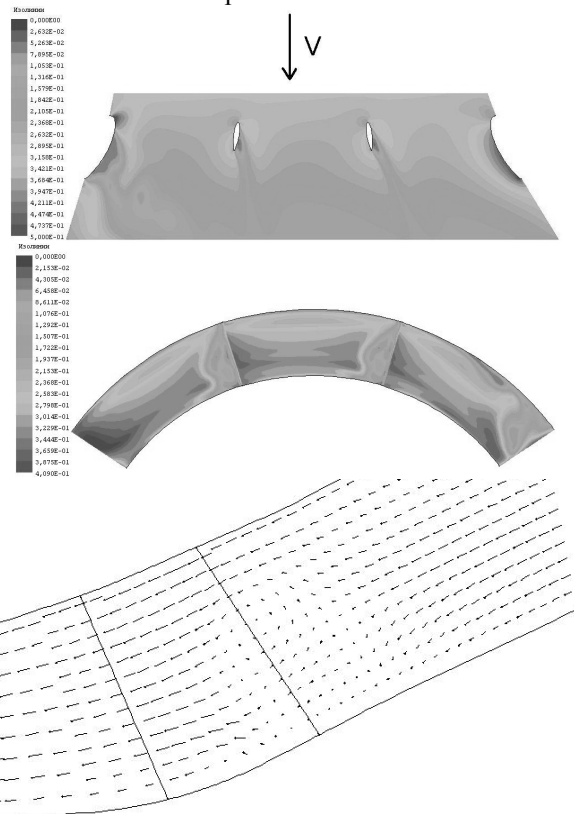


Рис. 5. Проточная часть № 2

Кроме того, видно, что в проточной части № 2 ниже аэродинамическая эффективность 1-й ступени СТ, но суммарные потери кинетической энергии [1]

в ней меньше на 1,2%. Аналогичная картина наблюдается и по мощности (табл. 2) – суммарная мощность больше на 1,6% в проточной части № 2, но при этом мощность 1-й СТ снизилась на 0,4%. Проведенные расчеты показали, что выигрыш от модернизации ТНД, при ее совместной работе с переходным диффузором и 1-й ступенью СТ, является существенным.

Таблица 1
Потери кинетической энергии [%]

Сечение	Проточная часть № 1	Проточная часть № 2	Проточная часть № 3
2	3,019	2,038	1,963
2а	3,937	2,474	2,340
3	4,670	3,076	2,871
5	6,607	5,373	5,068

Таблица 2
Мощность [МВт]

Объект	Проточная часть № 1	Проточная часть № 2	Проточная часть № 3
ТНД	17,74	18,14	17,83
СТ	5,439	5,419	5,813
ТНД+СТ	23,18	23,56	23,64

Анализ результатов показал, что переходник и СТ имеют резервы для повышения их аэродинамической эффективности. С этой целью была проведена численная модернизация проточной части, в ходе которой рассматривалось несколько десятков вариантов конструкций, одной из которых являлась проточная часть с ТНД обеспечивающей угол выхода потока близкий к осевому [10]. В этом случае существенно уменьшились отрывы в переходном диффузоре (даже по сравнению с проточной частью № 1), но суммарные потери кинетической энергии увеличились (по сравнению с проточной частью № 2). Из всех рассмотренных вариантов, наиболее удачной оказалась проточная часть, вид которой показан на рис. 1, в, 2, в и 2, г (проточная часть № 3). В проточной части №3 модифицированы меридиональные обводы и 1-я ступень СТ. Для уменьшения диффузорности течения, перед СТ «поджаты» меридиональные обводы. Необходимо отметить, что при проектировании ступени, расположенной за пере-

ходником, достаточно часто, не учитывается ни то, что поток перед нею имеет не нулевой меридиональный угол и ни то, что, параметры потока существенно неравномерные в радиальном направлении. Эти факторы приводят к значительному отличию реального обтекания от проектного. В 1-й ступени СТ изменена крутка лопаток с целью как ее подстройки под углы натекания, так и для перераспределения реактивности по высоте канала. На рис. 6 показана визуализация течения в переходном диффузоре проточной части № 3. Видно, что интенсивность отрывных течений уменьшилась незначительно по сравнению с проточной частью № 2, но, несмотря на это, аэродинамическая эффективность улучшилась. В результате проведенной модификации уменьшились потери кинетической энергии не только в переходнике и 1-й ступени СТ, но и в ТНД, что свидетельствует о необходимости учета влияния узлов турбины друг на друга как вниз, так и вверх по потоку. Суммарный выигрыш по потерям кинетической энергии и мощности составил 1,6% и 2,0% соответственно

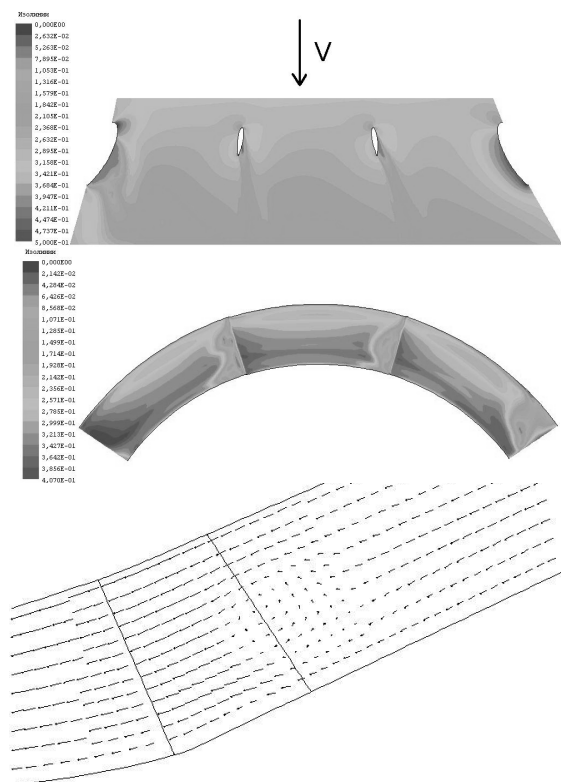


Рис. 6. Проточная часть № 3

Заключение

Выполнено численное исследование течения в исходной и модифицированных проточных частях турбомашин, состоящих из ТНД, переходного диффузора и 1-й ступени силовой турбины. Показано, что в проточной части с модифицированным ТНД [10] уменьшаются потери кинетической энергии и увеличивается мощность на 1,2 и 1,6%, соответственно. Дополнительная модернизация переходника и 1-й ступени СТ повышает выигрыш по потерям кинетической энергии до 1,6% и по мощности до 2,0%. Исследование подтвердило важность учета взаимного влияния узлов конструкций турбин при их изменениях (даже относительно небольших), что повышает актуальность разработки эффективных программных кодов, позволяющих проводить сквозные расчеты пространственных вязких течений в большом числе элементов турбомашин. Представляется целесообразным провести исследование течения и при необходимости выполнить модернизацию рассмотренных конструкций в составе турбины в целом, состоящей из турбины высокого давления, ТНД, переходного диффузора, СТ и выходного устройства.

Автору выражают благодарность ведущему конструктору Шаровскому М.А. за полезное обсуждение работы.

Литература

1. Щегляев А.В. Паровые турбины. – М.: Энергия, 1976. – 358 с.
2. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 671 с.
3. FLUENT News // Fluent Inc. – 1997. – 6, № 1. – 16 р.

4. CFX Update // UK AEA Technology, Harwell Laboratory. – Harwell. – 1997. – № 13. – 16 р.

5. Ершов С.В., Русанов А.В. Комплекс программ розрахунку тривимірних течій газу в багатовісцевих турбомашинах “FlowER”. Свід. про держ. реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77. Держ. агентство України з авторських та суміжних прав, 19.02.1996.

6. Ершов С.В., Шапочка А.Ю., Русанов А.В. Оптимальное пространственное профилирование лопаточных аппаратов турбинных ступеней на основе моделирования трехмерного вязкого течения // Проблемы машиностроения. – 2000. – № 3 – 4. – С. 36 – 46.

7. Русанов А.В., Ершов С.В. Метод расчета трехмерных турбулентных течений в проточных частях произвольной формы // Совершенствование турбоустановок методами мат. и физ. моделирования: Сб. науч. трудов ИПМаш НАН Украины. – Х.: ИПМаш. – 2003. – С. 132 – 136.

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

9. Ершов С.В. Квазимонотонная ENO схема повышенной точности для интегрирования уравнений Эйлера и Навье-Стокса // Математическое моделирование. – 1994. – № 11. – С. 58 – 64.

10. Русанов А.В., Ершов С.В., Исаков Б.В., Спицын В.Е., Усатенко А.А. Аэродинамическое усовершенствование проточной части турбины ГТД на основе расчетов трехмерного вязкого течения. Ч. 1. Ступени турбин высокого и низкого давления // Авиац.-косм. техника и технология. – 2004. – № 2. – С. 17 – 21.

Поступила в редакцию 29.04.2004

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