

УДК 621.165:532.6

А.В. РУСАНОВ, В.В. СОЛОВЕЙ, В.Н. ГОЛОЩАПОВ, О.И. ШАТРАВКА

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВОДОРОДНОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Рассмотрена возможность применения термохимической технологии сжатия рабочего тела при использовании водорода в замкнутых циклах ГТУ. Представлены результаты профилирования элементов проточной части водородной турбины, проведен сравнительный анализ режимных и конструктивных характеристик входных радиально-осевой и осевой ступеней турбомшины. Для обеспечения высокого аэродинамического совершенства последней ступени предложен вариант осевой конструкции с переменным по высоте профилем лопатки и определены ее основные характеристики. Сформирован конструктивный облик водородной турбины высокого давления с уровнем суммарного внутреннего КПД 90%.

Ключевые слова: газотурбинная установка, проточная часть, термохимический термосорбционный компрессор, вычислительная аэродинамика, трехмерное вязкое течение.

Введение

Использование в качестве рабочего тела газов с малой молекулярной массой – водорода или гелия, открывает перспективы создания эффективных энергоустановок с турбопреобразователями, обладающих рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными ГТУ. Легкие газы имеют лучшие теплофизические свойства, что может обеспечить минимизацию массы и габаритов основного оборудования, входящего в комплект энергоустановок.

Накопленный опыт развития технологий и конструкций, в которых используется водород (химические и металлургические технологии, турбодетандерные установки для ожижения водорода и др.) позволяет решать многие проблемы, возникающие при использовании водорода в качестве рабочего тела в энергетических комплексах. Сегодня имеется опыт длительной эксплуатации энергетических турбин на гелии, который по своим теплофизическим свойствам близок к водороду. Первой в мире установкой такого типа является ГТУ замкнутого цикла, которая эксплуатируется на электростанции в Оберхаузене (ФРГ) [1] и предназначена для выработки электроэнергии (50 МВт) и теплоты (53,5 МВт). К ее преимуществам по сравнению с ПТУ можно отнести: более эффективное использование располагаемого температурного потенциала, меньшую длину лопаток последней ступени турбины, малую потребность в охлаждающей воде, более высокую совместимость при компоновке с сухой градирней,

лучшие теплофикационные характеристики.

Применение водорода в качестве рабочего тела дает возможность создать высокоэффективный в термодинамическом отношении цикл энергетических установок с термохимическим сжатием рабочего тела. Применение термохимического термосорбционного компрессора (ТСК) [2, 3] позволяет использовать низкопотенциальное тепло для получения достаточно высокой степени сжатия водорода (на уровне 15,0 – 20,0 МПа, рис.1). Такое сжатие требует особого подхода к созданию расширительной машины роторного типа для энергоустановок с ТСК замкнутого цикла.

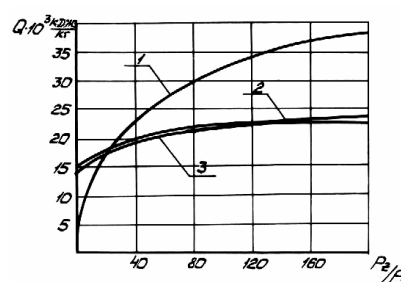


Рис. 1. Затраты первичной энергии в форме тепла на сжатие водорода:

- 1 – механическое сжатие;
- 2 – сжатие в ТСК с LaNi_5H_x ;
- 3 – сжатие в ТСК с FeTiH_x

Высокая степень сжатия водорода и, как следствие, малые удельные объемы движущегося в турбине рабочего тела накладывают определенные условия как на выбор типа проточной части турбины,

так и на количество ступеней. Среди известных типов ступеней турбин (осевые, центробежные, центробежные) необходимо провести выбор рациональной формы проточной части с учетом различных геометрических особенностей, которая позволит обеспечить высокую экономичность энергоустановки.

В работе рассмотрены примеры характерных ступеней водородной турбины, при проектировании которых использовались современные методы профилирования и газодинамических расчетов проточных частей.

1. Метод расчета и профилирования проточной части

Расчеты трехмерных вязких течений выполнены с использованием программного комплекса **FlowER** [4], предназначенного для исследования течений в проточных частях турбомашин. В комплексе реализованы следующие элементы математической модели: осредненные по Рейнольдсу нестационарные уравнения Навье-Стокса, двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности SST Ментера, неявная квазимонотонная ENO-схема повышенной точности [5, 6].

Геометрическая форма каналов исследуемых ступеней проточных частей разработана с помощью метода, в котором профили лопаток описываются кривыми четвертого порядка [7].

2. Первая ступень водородной турбины

Рассмотрены два варианта конструкции первой ступени: радиально-осевая и осевая. Расчеты выполнены при одинаковых параметрах рабочего тела на входе и оборотах ротора:

- полное давление – 10 МПа;
- полная температура – 500 К;
- угол натекания потока – перпендикулярный к фронту решетки;
- частота вращения ротора – 90000 об/мин.

2.1 Радиально-осевая конструкция ступени

Вид радиально-осевой ступени представлен на рис. 2, а ее основные геометрические характеристики, полученные в результате расчетного исследования, – в табл. 1.

В разработанной конструкции радиально-осевой ступени высота канала на радиальном участке (расстояние между обводами) составляет 2 мм, из-за чего могут возникнуть некоторые технологические сложности при производстве проточной части. Несмотря на это, число Рейнольдса, посчитанное

по высоте канала и параметрам потока на входе в ступень, равно $\sim 1,7 \cdot 10^5$, т.е. величина пограничных слоев как на меридиональных обводах, так и на поверхностях профильной части каналов, с учетом общего характера конфузурности течения, не будет достигать величин, при которых целесообразно использование парциального подвода.

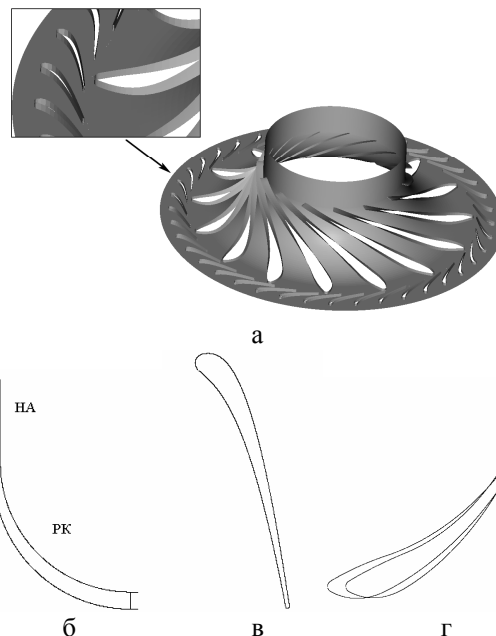


Рис. 2. Первая ступень водородной турбины радиально-осевого типа: а – общий вид ступени; б – меридиональное сечение; в – направляющая лопатка; г – рабочая лопатка

Таблица 1
Основные геометрические характеристики
1-й ступени радиально-осевого типа

Параметр	НА	РК
Число лопаток	40	15
Диаметр по входной кромке, м *	0,23	0,2
Диаметр по выходной кромке, м *	0,204	0,105
Высота канала на входе, м	0,002	0,002
Высота канала на выходе, м	0,002	0,005
Эффективный угол решетки, градус	12,1	23,8

* по среднему сечению

Расчет проведен на сетке с суммарным числом ячеек равным 705600.

Размеры минимальных ячеек у стенок выбирались таким образом, чтобы безразмерная величина y^+ не превышала 10.

На рис. 3 представлена визуализация течения по средним сечениям в двух плоскостях, а в табл. 2

приведены интегральные газодинамические характеристики ступени.

Таблица 2

Интегральные газодинамические характеристики первой ступени

Параметр	Радиально-осевая ступень	Осевая ступень
Массовый расход, кг/с	1,075	1,067
Статическая температура на выходе, К	437,45	472,19
Степень понижения полного давления	1,64554	1,24047
Абсолютный угол выхода потока (от осевого направления), градус	2,25	–0,2
Потери кинетической энергии, %	9,3%	11,46%
Потери кинетической энергии с выходной скоростью, %	2,3%	3,35%
Внутренний КПД, %	90,7%	88,34%
Мощность ступени, кВт	970,062	417,863

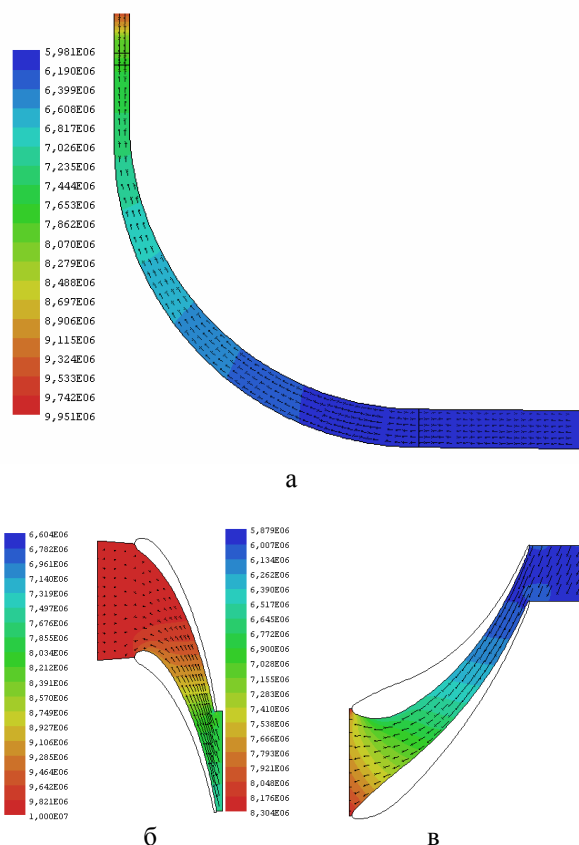


Рис. 3. Изолинии давления и векторы скорости первой ступени радиально-осевого типа:
а – среднее сечение в меридиональной плоскости;
б – среднее сечение канала НА;
в – среднее сечение канала РК

Из представленных результатов видно, что в целом наблюдается благоприятная безотрывная картина течения и, как предполагалось выше, относительная толщина пограничных слоев не велика. Для подобного рода конструкций разработанная ступень имеет достаточно низкие потери кинетической энергии и высокий внутренний КПД. При этом она является высоконагруженной, за счет чего обеспечивает срабатывание значительного теплового перепада, и, как следствие, ступень вырабатывает большую мощность.

2.2 Конструкция осевой ступени

Вид осевой ступени представлен на рис. 4, а ее основные геометрические характеристики – в табл. 3.

В отличие от радиально-осевой конструкции осевая ступень имеет большую высоту канала и лопатки с постоянным сечением профиля, что делает ее производство технологически более простым и, соответственно, менее дорогостоящим.

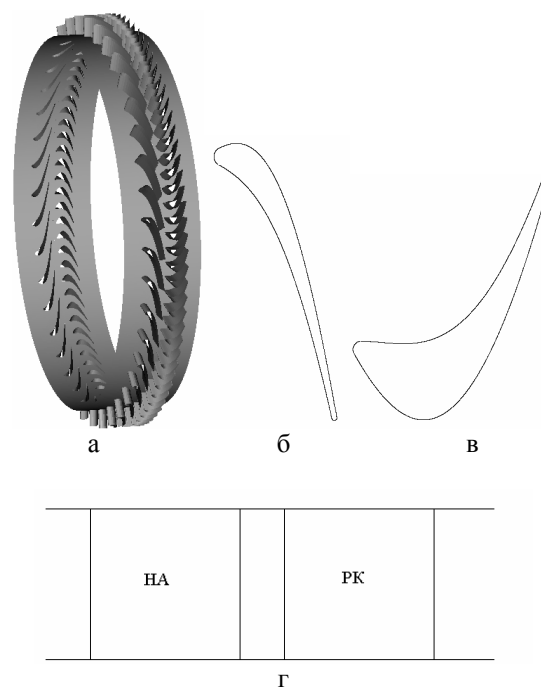


Рис. 4. Первая ступень осевого типа:
а – общий вид ступени; б – направляющая лопатка;
в – рабочая лопатка; г – меридиональное сечение

Расчет проведен на сетке с суммарным числом ячеек равным 576000. Размеры минимальных ячеек у стенок выбирались таким образом, чтобы безразмерная величина y^+ не превышала 10.

На рис. 5 представлена визуализация течения по средним сечениям в двух плоскостях, а в табл. 2 приведены интегральные газодинамические характеристики ступени.

Таблица 3

Основные геометрические характеристики
1-й ступени осевого типа

Параметр	НА	РК
Число лопаток	40	80
Диаметр по входной кромке, м *	0,105	0,105
Диаметр по выходной кромке, м *	0,105	0,105
Высота канала на входе, м	0,005	0,005
Высота канала на выходе, м	0,005	0,005
Эффективный угол решетки, градус	10,8	16,5

* по среднему сечению

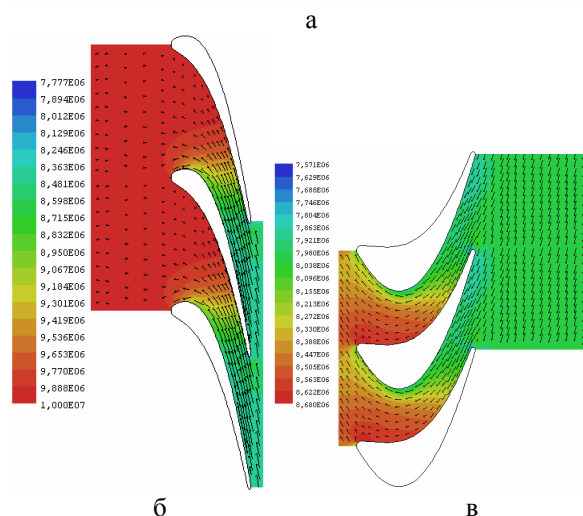
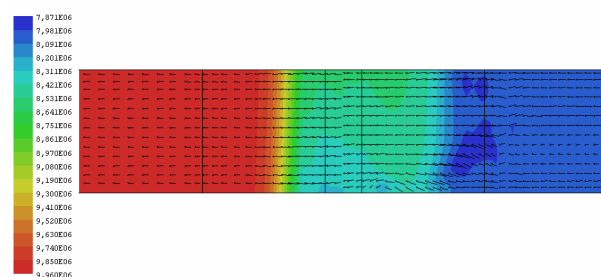


Рис. 5. Изолинии давления и векторы скорости
в первой ступени осевого типа:

а – среднее сечение в меридиональной плоскости;
б – среднее сечение канала НА;
в – среднее сечение канала РК

Из представленных результатов (см. табл.3) следует, что уровень аэродинамического совершенства осевой ступени достаточно высокий, но при этом он значительно ниже по сравнению с радиально-осевой конструкцией как по величине потерь кинетической энергии и внутреннего КПД, так и значению срабатываемого теплового перепада и, соответственно, вырабатываемой мощности.

3. Конструкция последней ступени водородной турбины

Вид ступени представлен на рис. 6, а ее основные геометрические характеристики – в табл. 4.

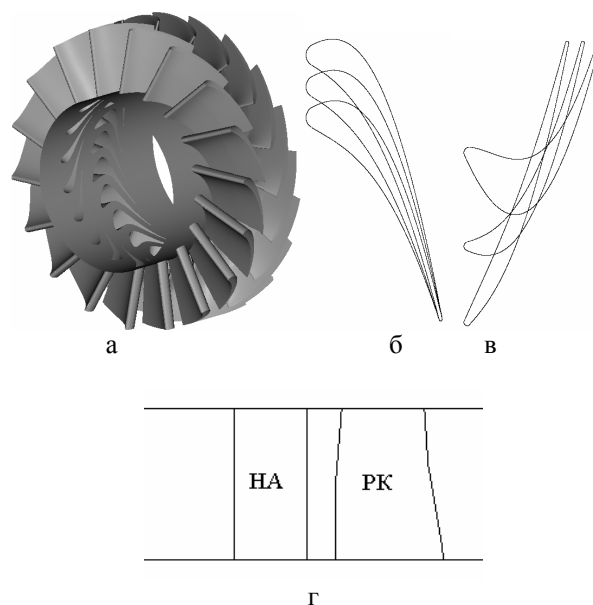


Рис. 6. Последняя ступень осевого типа:
а – общий вид ступени; б – направляющая лопатка;
в – рабочая лопатка; г – меридиональное сечение

Таблица 4

Основные геометрические характеристики
последней ступени

Параметр	НА	РК
Число лопаток	18	20
Диаметр по входной кромке, м *	0,138	0,138
Диаметр по выходной кромке, м *	0,138	0,138
Высота канала на входе, м	0,038	0,038
Высота канала на выходе, м	0,038	0,038
Эффективный угол решетки, градус	14,4	13,6

* по среднему сечению

По сравнению с первой ступенью веерность венцов последней ступени значительно выше, из-за чего для обеспечения удовлетворительных аэродинамических характеристик она выполнена с переменными по высоте профилями лопаток.

Расчет проведен на сетке с суммарным числом ячеек равным 576000.

Размеры минимальных ячеек у стенок выбирались таким образом, чтобы безразмерная величина y^+ не превышала 10.

Исследование выполнено при следующих параметрах рабочего тела на входе и оборотах ротора:

- полное давление – 5,15 МПа;
- полная температура – 273 К;
- угол натекания потока – осевой ;
- частота вращения ротора – 90000 об/мин.

На рис. 7 представлена визуализация течения по средним сечениям в двух плоскостях, а в табл. 5 даны интегральные газодинамические характеристики ступени.

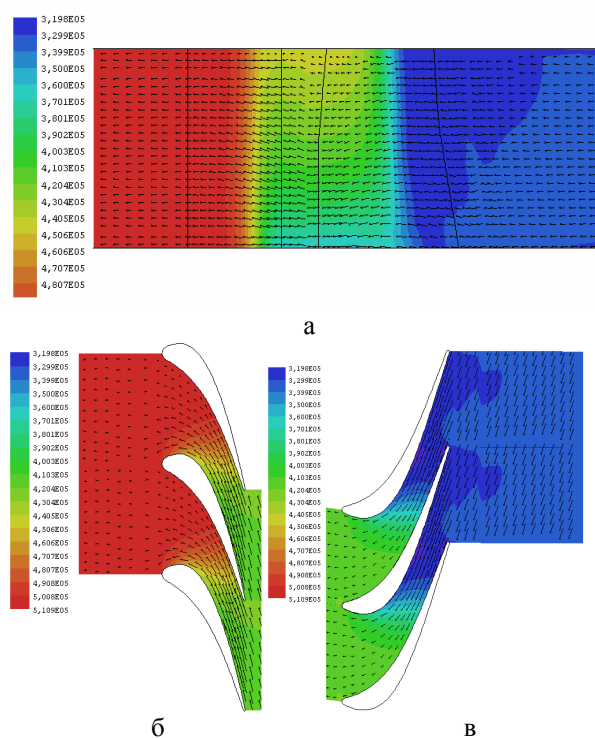


Рис. 7. Изолинии давления и векторы скорости в последней ступени.

а – среднее сечение в меридиональной плоскости;

б – среднее сечение канала НА;

в – среднее сечение канала РК

Таблица 5

Интегральные газодинамические характеристики последней ступени

Параметр	Значение
Массовый расход, кг/с	1,048
Статическая температура на выходе, К	242,515
Степень понижения полного давления	1,52934
Абсолютный угол выхода потока из ступени (от осевого направления), градус	-2,59
Потери кинетической энергии, %	8,01%
Потери кинетической энергии с учетом выходной скорости, %	4,33%
Внутренний КПД, %	91,99%
Мощность ступени, кВт	451,376

Из представленных результатов следует, что в предложенной проточной части наблюдается удовлетворительная картина обтекания, а ступень имеет достаточно высокие интегральные аэродинамические характеристики как по уровню потерь кинетической энергии и внутреннего КПД, так и по степени понижения полного давления.

Заключение

С целью совершенствования технико-экономических характеристик теплоутилизационного оборудования рассмотрена возможность применения термохимической технологии сжатия рабочего тела при использовании водорода в замкнутых циклах ГТУ с ТСК.

На основании результатов профилирования элементов проточной части водородной турбины, полученных с использованием данных расчетно-теоретического исследования трехмерных вязких течений, проведен сравнительный анализ режимных и конструктивных характеристик входных радиально-осевой и осевой ступеней турбомашин и установлено термодинамическое преимущество радиально-осевого варианта конструкции. Для обеспечения высокого аэродинамического совершенства последней ступени предложен вариант осевой конструкции с переменным по высоте профилем лопатки и определены ее основные характеристики. Полученные данные позволили сформировать конструктивный облик водородной турбины высокого давления с уровнем суммарного внутреннего КПД выше 9%. Суммарное число ступеней в турбине необходимое для обеспечения понижения давления от 10,0 МПа до 0,3 МПа будет составлять от 6 до 11 (в зависимости от типа используемых ступеней).

Литература

1. Бекнев В.С. Расчет и проектирование осевых турбин на гелии / В.С. Бекнев, И.Г. Суровцев, Р.З. Тумашов. – М.: РИО МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1978. – 32 с.
2. Абрамов Ю.А. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых установок / Ю.А. Абрамов, В.И. Кривцова, В.В. Соловей. – Х.: Фолио, 2002. – 369 с.
3. Соловей В.В. Металлогидридные энерготехнологии. Проблемы и перспективы / В.В. Соловей, Ю.Ф. Шмалько, М.В. Лотоцкий // Проблемы машиностроения. – 1999. - № 1 - С. 115-132.
4. А.с. № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовіцевих турбомашинах "FlowER" / С.В. Єршов, А.В. Русанов. – 1996.

5. Русанов А.В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин / А.В. Русанов, С.В. Еришов. – Х.: ИПМаш НАН Украины, 2008. – 275 с.

6. Аэродинамический расчет и оптимальное 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.

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

Поступила в редакцию 29.05.2009

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

ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ВОДНЕВОЇ ТУРБІНИ ДЛЯ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

А.В. Русанов, В.В. Соловей, В.М. Голощапов, О.І. Шатравка

Розглянута можливість вживання термохімічної технології стискування робочого тіла при використанні водню в замкнутих циклах ГТУ. Представлені результати профілювання елементів проточної частини водневої турбіни, проведено порівняльний аналіз режимних і конструктивних характеристик вхідних радіально-осьового і осьового ступенів турбомашини. Для забезпечення високої аеродинамічної досконалості останнього ступеня запропоновано варіант осьової конструкції із змінним по висоті профілем лопатки і визначені її основні характеристики. Сформована конструктивний вигляд водневої турбіни високого тиску з сумарним внутрішнім ККД 90%.

Ключові слова: газотурбінна установка, проточна частина, термохімічний термосорбційний компресор, обчислювальна аеродинаміка, тривимірна в'язка течія.

THE USAGE OF MODERN COMPUTER TECHNOLOGY WHILE DESIGNING FLOWPART OF THE HYDROGEN TURBINE FOR WARMTH RECYCLING POWER

A.V. Rusanov, V.V. Solovey, V.M. Goloschapov, O.I. Shatravka

The possibility of application for thermochemical technology of working body compression under hydrogen usage in the closed-cycled gas turbine has been considered. The results of profiling for the elements of the flowpart of the hydrogen turbine has been considered, the comparative analysis of mode and constructive characteristics of the input radial-axial and axial stages of the turbomachine has been done. For providing high aerodynamic perfection of the last stage, the variant of the axial construction with alternating in height scapula profile its main characteristics have been determined. The constructive appearance of the hydrogen high pressure turbine with total level of inner efficiency of 90% has been formed.

Key words: gas turbine plant, flowpart, thermochemical termosorbition compressor, computational aerodynamics, three-dimensional viscous flow.

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

Соловей Виктор Васильевич – д-р техн. наук, зав. отделом ИПМаш НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: solovey@ipmach.kharkov.ua.

Голощапов Владимир Николаевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник ИПМаш НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: paramonova@ipmach.kharkov.ua.

Шатравка Олег Игоревич – аспирант НТУ «ХПИ», Харьков, Украина.