

РАСЧЕТ СУММАРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕССОРОВ ПО ИДЕНТИ- ФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD-ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящей работе рассмотрены вопросы по идентификации одномерных газодинамических характеристик по результатам расчета характеристик ступеней с использованием CFD – технологий. Объектом исследования является компрессор изделия GT25000 спроектированный и изготовленный ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект». Разработанные и описанные в статье методы позволяют получить полноразмерные суммарные газодинамические характеристики компрессора при малых затратах вычислительного времени

Ключевые слова: компрессор, расход, теоретический напор, КПД

Issues related identification of 1-D gas dynamic characteristics based on stage mapping using CFD technologies are addressed in this paper. Compressor of GT25000 gas turbine engine developed and manufactured at «Zorya»-«Mashproekt» SC GTRPC is taken as a test object. Methods developed and described in this paper enable to obtain full scale total gas dynamic compressor characteristics at low processing time

Keywords: the compressor, the charge, a theoretical pressure, EFFICIENCY

В.Е. Спицын

Кандидат технических наук, главный конструктор
ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»

Директор

ЦНИОКР «Зоря»-«Машпроект»

Контактный тел.: 8 (0512) 22-13-48

E-mail: ves@mashproekt.nikolaev.ua

М.А. Шаровский

Начальник*

Контактный тел.: 38 (0512) 49-76-74

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

А.В. Ивченко

Ведущий специалист*

Контактный тел.: 8 (0512) 49-76-74

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

Е.А. Токарева

Ведущий специалист*

Контактный тел.: 8 (0512) 49-76-74

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

М.Ю. Шелковский

Инженер*

Контактный тел.: 8 (0512) 49-76-74

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

*Сектор газодинамики

Отдел компрессоров

ЦНИОКР «Зоря»-«Машпроект»

1. Введение

С целью получения расчетных суммарных газодинамических характеристик компрессора в широком диапазоне часто используется идентификация газодинамических характеристик ступеней по моделям газо-

динамических характеристик, полученных более сложными, как расчетными, так и экспериментальными методами. В настоящей работе идентификация одномерных газодинамических характеристик выполнена по результатам расчета характеристик ступеней с использованием программного комплекса ANSYS CFX.

Течение в проточной части современного компрессора имеет чрезвычайно сложный пространственный характер.

Связано это в первую очередь с конструктивными и газодинамическими особенностями лопаточных аппаратов. В последнее время наметилась тенденция перехода от традиционного квазидвухмерного метода расчета к моделированию течения в трехмерной постановке.

Математическая формулировка моделей основана на трехмерных уравнениях Навье - Стокса, осредненных по Рейнольдсу - Фавру. Одной из таких моделей есть модель программного комплекса ANSYS CFX, которая использовалась в представленных расчетах.

2. Построение расчетной модели для исследования и результаты расчета суммарных характеристик компрессоров, а также характеристик отдельных ступеней

С целью проверки суммарных газодинамических характеристик компрессоров низкого (КНД) и высокого (КВД) давления изделия GT25000 выполнены газодинамические расчеты компрессоров с помощью программного комплекса ANSYS CFX.

Для создания расчетной области использовалась импортированная из CFX TurboGrid расчетная сетка для каждого венца. Общее количество ячеек для чистового расчета взято 150000÷180000 для лопатки рабочего колеса и 150000÷160000 для лопатки направляющего аппарата.

При формировании расчетной модели учитывалось влияние радиальных зазоров по рабочим лопаткам компрессора и отборов-подводов воздуха из проточной части на течение газа в компрессоре, учитывалось влияние антипомпажной камеры, находящейся над рабочим колесом нулевой ступени КНД. Для определения суммарных газодинамических характеристик КНД сформированы две расчетные модели: - модель с углами установки поворотных направляющих аппаратов на «плюс» (номинальные режимы работы); и модель с углами установки поворотных направляющих аппаратов на «минус» (пусковые режимы работы).

В расчетной модели КВД также учитывались постоянные отборы воздуха на охлаждение (3,5% от G_{физ} из-за пятой ступени).

Расчеты выполнены на режимах $\bar{p}_{пр} = 0,6; 0,8; 1,0; 1,1$ по пять точек на каждой изодроме для каждого варианта расчетной модели.

Результаты расчета суммарной газодинамической характеристики КНД

$$\pi_{к\sum} = f_1(G_{впр}, p_{пр}),$$

$$\eta_{к\sum} = f_2(G_{впр}, p_{пр})$$

с углами установки поворотных направляющих лопаток на «плюс» и на «минус» представлены на рис. 1 и рис. 2, а на рис. 3 представлена суммарная газодинамическая характеристика КВД изделия GT25000 с расчетными и экспериментальными данными.

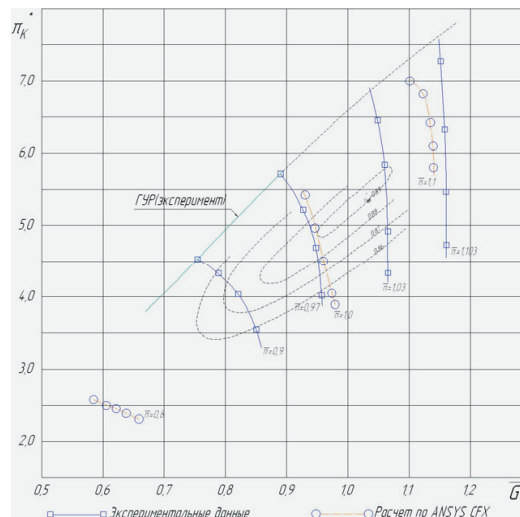


Рис. 1. Суммарная газодинамическая характеристика КНД на номинальных режимах

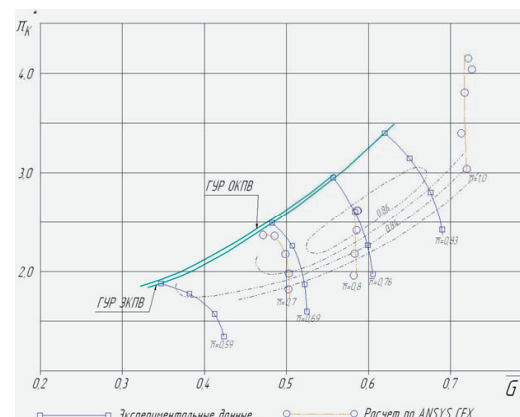


Рис. 2. Суммарная газодинамическая характеристика КНД на пусковых режимах

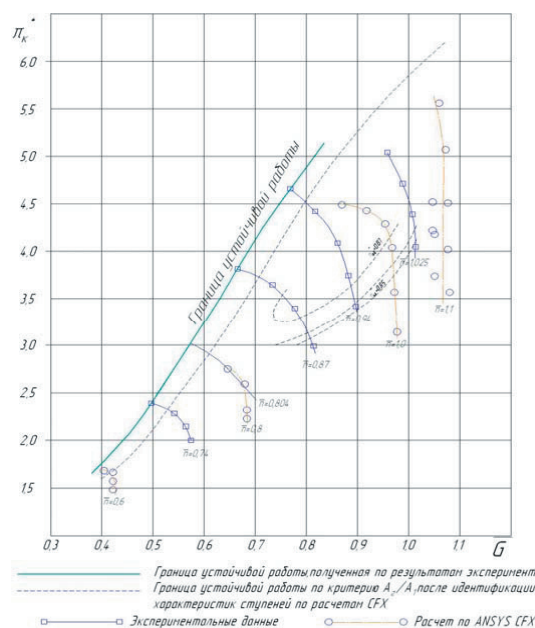


Рис. 3 Суммарная газодинамическая характеристика КВД

Расчетные характеристики по идентифицированной модели, трехмерному расчету и экспериментальным данным отдельных ступеней КНД и КВД в виде зависимостей $\bar{H}_{ад} = f_3(\bar{C}_{1a})$ и $\eta_{ад}^* = f_4(\bar{C}_{1a})$ представлены на рисунках 4 и 5. По результатам трехмерного расчета по отдельным ступеням получено недополучение напора от 2% до 9% по сравнению с экспериментальными характеристиками [3].

характеристик компрессора, как по расчетным суммарным характеристикам, так и по характеристикам ступеней, но предпочтение отдавалось эксперименту. С другой стороны применение идентифицированных характеристик в одномерных моделях позволяет получить достаточно много точек на суммарных газодинамических характеристиках при малых затратах вычислительного времени.

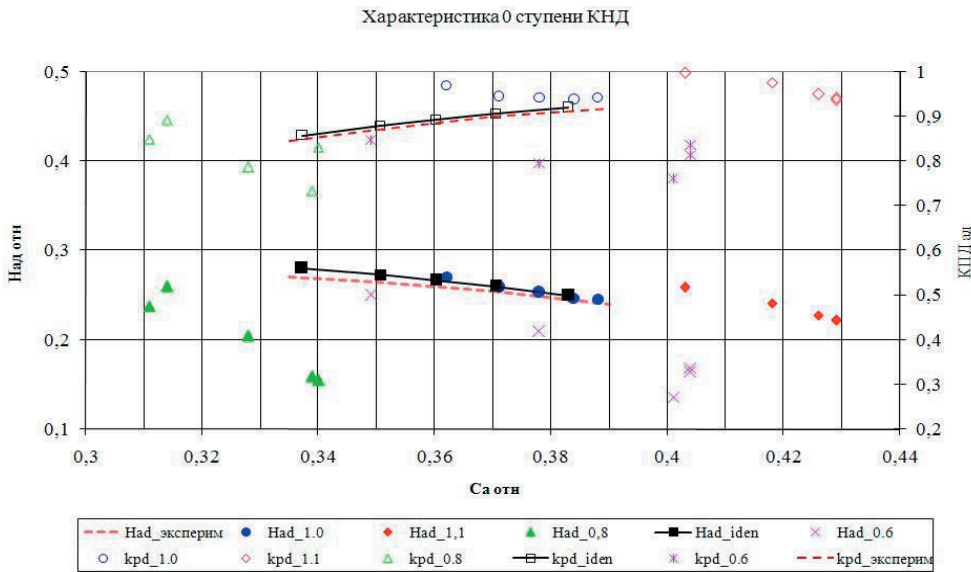


Рис. 4. Характеристика «нулевой» ступени КНД

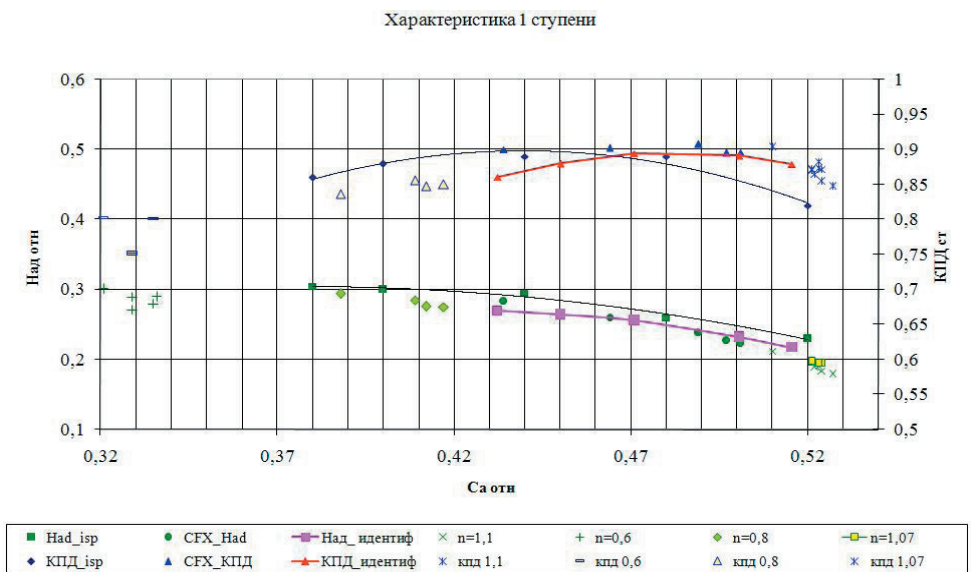


Рис.5. Характеристика первой ступени КВД

3. Задача идентификации характеристик ступеней компрессора

Для получения расчетных газодинамических характеристик ступеней компрессора используется идентификация этих характеристик с целью получения наиболее достоверных суммарных газодинамических

Для получения суммарных характеристик компрессора выполнена идентификация характеристик ступеней с помощью одномерной расчетной модели [1] [2].

4. Основные положения методики расчета характеристик ступеней по идентифицированной модели

В качестве безразмерных комплексов при изучении характеристик ступени используются величина коэффициента расхода:

$$\bar{C}_{1a} = \frac{C_{1a}}{U_k} \quad (4.1)$$

и коэффициент теоретического напора (или адиабатического $\bar{H}_{ад} = \bar{H}_T \cdot \eta_{ад}$):

$$\bar{H}_T = \frac{H_T}{U_k^2} \quad (4.2)$$

Подход к определению зависимости $\bar{H}_T = f_1(\bar{C}_{1a})$ при одномерных моделях описан в [1].

При обработке экспериментальных данных по замерам избыточного полного давления и температуры на входе и выходе из ступени использовался аналогичный подход для определения безразмерных величин

- коэффициента расхода:

$$\bar{C}_{a\ ijk} = \frac{\lambda_{ijk} \cdot \sin(\alpha_1)_k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot K}{K+1}} \cdot g \cdot R \cdot (T_1^*)_{ijk}}{(U_k)_{ijk}} \quad (4.3)$$

-коэффициента адиабатического напора ступени:

$$\overline{(H_{ал})}_{ijk} = \frac{K}{K-1} \cdot g \cdot R \cdot (T_1^*)_{ijk} \cdot \frac{(\pi^*)_{ijk}^{\frac{FK-1}{FK}} - 1}{(U_k)_{ijk}^2} \quad (4.4),$$

-адиабатический КПД ступени:

$$(\eta_{ал}^*)_{ijk} = \frac{(T_1^*)_{ijk} \cdot [(\pi^*)_{ijk}^{\frac{K-1}{K}} - 1]}{\Delta T_{ijk}^*} \quad (4.5)$$

где i - номер дросселя;
j - номер замера на i - ом дросселе;
k - номер ступени;
K - показатель адиабаты.

Для расчета характеристик и согласования их с экспериментальными, в методике предусмотрен ввод поправочных коэффициентов, варьируя которыми, можно добиваться идентификации расчетной характеристики компрессора и экспериментальной, или расчетной, полученной по трехмерной модели CFX с учетом вязкости.

Основными из этих коэффициентов являются:

- коэффициент изменения теоретического напора:

$$K_H = \frac{\overline{H}_{Тэ}}{\overline{H}_T} \quad (4.6)$$

где: \overline{H}_T - расчетный коэффициент теоретического напора на определенном режиме, а $\overline{H}_{Тэ}$ - экспериментальный коэффициент теоретического напора (расчетный по CFX) на этом же режиме;

- коэффициент изменения наклона напорной характеристики:

$$k_h = \frac{h}{h_{экс}} \quad (4.7)$$

5. Определение границы устойчивой работы для идентифицированной модели

Граница устойчивой работы идентифицированной модели компрессора высокого давления проведена с помощью статистических кривых относительно помпажной точки на номинальной частоте вращения.

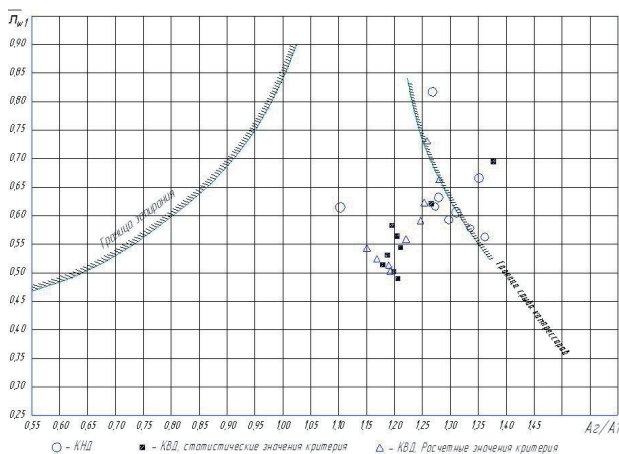


Рис. 6. Зависимость диффузности входного участка решетки от A_r/A_1 от приведенной скорости λ_{w1}

Статистические безразмерные зависимости границы устойчивой работы компрессора, представленные в координатах $\frac{G}{G_{ном}}, \frac{\pi_k^* - 1}{\pi_{кг}^* - 1}$ (рис. 8), были получены в результате осреднения экспериментальных точек, снятых на границах устойчивой работы различных двигателей. За единицу была принята точка на расчетных оборотах $\bar{n} = 1,0$, находящаяся на границе устойчивой работы.

Основными критериями оценки срыва рабочих колес были выбраны

- диффузность входного участка решетки:

$$\left[\left(\frac{A_r}{A_1} \right)_{ПК} \right] = \left[\left(\frac{A_r}{t_1} \right)_{ПК} \right] \cdot \frac{1}{\sin(\beta_1)} \quad (5.1)$$

где

$$\left[\left(\frac{A_N}{t_1} \right)_{ПК} \right] =$$

$$= \frac{\sqrt{\left(\frac{b_1}{(t_{1ПК})} \right)^2 + 4 \cdot \frac{b_1}{(t_{1ПК})} \cdot \sin\left((\beta_{yct}) - \frac{\theta_{ПК}}{2} \right) \cdot \sin \frac{\theta_{ПК}}{2} + 4 \cdot \left(\sin \frac{\theta_{ПК}}{2} \right)^2} - \frac{b_1}{t_{1ПК}}}{2 \cdot \sin\left(\frac{(\theta_{ПК})_k}{2} \right)} - 0,62 \cdot (\overline{C_{mПК}}) \cdot \frac{b_1}{t_{1ПК}}$$

- коэффициент диффузности по Либляйну:

$$D_{LPK} = 1 - \frac{W_2}{W_1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{b_1}{t_{1ПК}} \times \frac{\overline{C_a} \cdot U_K \cdot \text{ctg} \beta_1 \cdot r_{cp1} - C_{2u} \cdot \text{tg} \alpha_2 \cdot \text{ctg} \beta_2 \cdot \sin \beta_1}{\overline{C_{2a}} \cdot U_K \cdot r_{cp1}} \quad (5.3)$$

При расчете компрессора по одномерной модели определялись вышеперечисленные критерии в точке на границе устойчивой работы компрессора на номинальной изодроме.

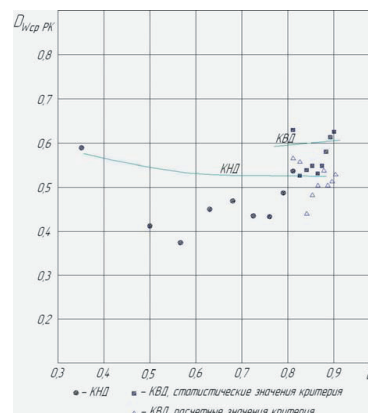


Рис. 7. Зависимость коэффициента диффузности по Либляйну D_w при различных значениях $d_{вт}$.

Для определения статистической границы срыва компрессора при $\bar{n} = 1,0$ по параметрам $A_r/A_1 = f_8(\lambda_{w1})$ и $D_w = f_9(\bar{d}_{вт})$ использовались данные из [3] (рис. 6 и 7), при этом предпочтение отдавалось зависимости $A_r/A_1 = f_8(\lambda_{w1})$. Граница запираания взята из [1]. Значения параметров на границе срыва компрессоров были получены обобщением экспериментальных данных на номинальных и пусковых режимах, а затем результаты осреднены методом геометрического осреднения.

Положение границы устойчивой работы в координатах G, π_k^* , на идентифицированной модели определялось пересчетом статистических данных на текущее значение:

$$G = \frac{G}{G_{ном}} \cdot G_{ном} \quad (5.4)$$

$$\pi_k^* = \left(\frac{\pi_k^* - 1}{\pi_{кгр}^* - 1} \cdot \pi_{кгр}^* \right) + 1 \quad (5.5)$$

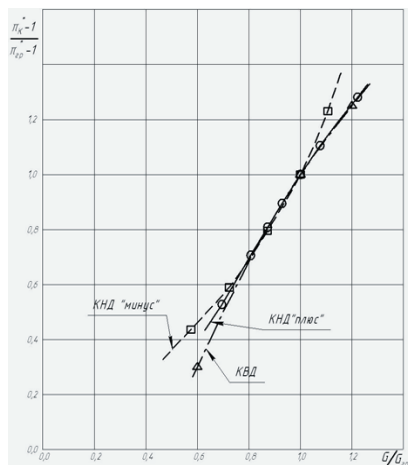


Рис.8. Статистические безразмерные зависимости границы устойчивой работы компрессора

6. Выводы

1. Для КНД расчет газодинамических характеристик по CFХ показал высокую точность (до 1%) по напору и оборотности для номинальных режимов.
2. Для пусковых режимов КНД расчет газодинамических характеристик по трехмерным моделям дает низкую точность (до 10%).
3. Следует отметить, что расчетная граница устойчивости компрессоров КНД и КВД по CFХ определялась по наличию сходимости процесса решения и результаты противоречивы.
4. Суммарные газодинамические характеристики компрессора высокого давления, как и в случае газодинамических характеристик полученных по CFХ, имеют более высокие обороты в каждой точке и пониженные запасы устойчивости по сравнению с серийными суммарными газодинамическими характеристиками КВД GT25000 [3] на 5%.
5. По результатам трехмерного расчета КВД по отдельным ступеням получено недополучение напора от 2% до 9% по сравнению с экспериментальными характеристиками.

Литература

1. Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: "Машиностроение". – 1986. – с. 432.
2. Гельмедов Ф.Ш., Милешин В.И., Сачкова Н.Г., Сальников В.С., Тальзина В.С. Методология проектирования осевого компрессора. Теплоэнергетика. – №9. – 2002.
3. Газодинамический расчет двухкаскадного компрессора двигателя GT25000. Технический отчет.
4. Методика оценки положения границы устойчивой работы компрессоров, обработки статистических данных по критериям устойчивости КНД и КВД. Технический отчет.