

В.В. Романов, канд. техн. наук, Николаев, Украина

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 15 СТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГТД – 110

Приведены результаты расчетов и экспериментальной пятнадцатиступенчатого осевого компрессора на семиступенчатой модели первых ступеней. С использованием статистических методов планирования эксперимента получены оптимальные углы установки первых трёх направляющих аппаратов, обеспечивающие максимальный КПД на номинальной частоте вращения. Представлены экспериментальные газодинамические характеристики компрессора, полученные в составе ГТД - 110.

This paper presents the results of the experimental refinement of a 15-stage axial compressor in a 7-stage model of the first stages. Using statistical methods of test planning optimum blade angles for the first guide vane assemblies have been obtained which ensure maximum efficiency when operating at nominal rotational speed. Test gas dynamic characteristics of the GTE-110 compressor are provided.

Газотурбинный двигатель создан на предприятии ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» для использования в составе парогазовой установки суммарной мощностью 325 МВт (Рис. 1).

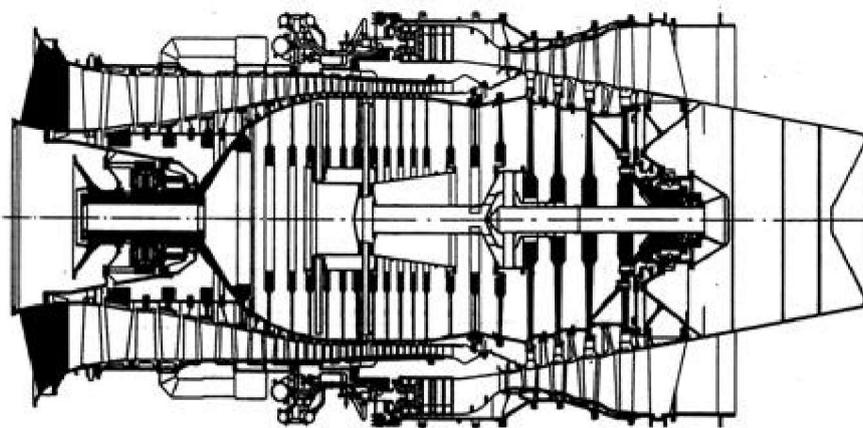


Рис. 1. Конструктивная схема ГТД – 110

Основные параметры одновального двигателя ГТД – 110 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Мощность на клеммах турбогенератора, МВт	110
Приведенный расход воздуха через двигатель, кг/с	360,8
Степень повышения полного давления в компрессоре	14,75
Температура газа перед турбиной, К	1483
КПД двигателя согласно ИСО, %	36,0
Частота вращения ротора, об/мин	3000
Общий ресурс двигателя, час	100000

При создании компрессора в качестве прототипа второй-седьмой ступеней был использован шестиступенчатый осевой компрессор высокого давления (КВД) изделия «99», имеющего достаточно высокие показатели по КПД и запасу устойчивой работы. Параметры первой ступени выбирались из условия пристыковки ее к модели КВД-99 в поле характеристик с высоким значением КПД и достаточным ΔK_y .

Так, при степени повышения полного давления первой ступени $\pi_{\sigma}^* = 1.37$ параметры, приведенные к выходу из нее (входу в КВД-99) будут следующие:

– приведенный расход $G_{\text{пр}} = 273,9$ кг/с;

– приведенная частота вращения $n_{\text{пр}} = 2853$ об/мин.

На расчетно-экспериментальной характеристике КВД-99 на линии максимального КПД выбрана точка для последующего моделирования: $\bar{n}_{\text{пр}} = 0,899$ ($n_{\text{пр}} = 10115$) об/мин, $G_{\text{пр}} = 21,8$ кг/с и $\pi_K^* = 5,50$. Таким образом, коэффициент моделирования будет равен $m = \sqrt{273,9/21,8}$.

Однокаскадный компрессор изделия ГТД – 110 состоит из первой вновь спроектированной ступени, смоделированного КВД – 99 и восьмиступенчатого выходного блока. Для первой ступени был выбран закон закрутки по высоте из условия получения геометрического угла у втулки не больше 90° . В отличие от КВД – 99 для увеличения запасов устойчивости и улучшения прочностных характеристик в первых пяти ступенях компрессора ГТД – 110 уменьшено удлинение лопаток за счет увеличения хорды профиля. Для всех ступеней, кроме первого рабочего колеса, принят исходный профиль ВС – 10. Средняя линия профиля – дуга гиперболы ($\bar{x}_f = 0,45$), а ось лопатки совпадает с центром тяжести профилей.

Следует отметить, что моделированию не подвергались величины радиальных и осевых зазоров. Радиальный зазор с первой по восьмую ступени принят равным 2 мм, а в остальных ступенях – 1,7 мм. При таких величинах Δ_r относительная величина радиального зазора с первой по пятнадцатую ступени изменяется в пределах 0,47...1,68%.

При регулировании компрессора на нерасчетных режимах работы путем существенного прикрытия лопаток входного направляющего аппарата (ВНА) по рекомендациям ЦИАМ были выбраны отрицательные углы атаки, которые приняты равными -5° .

С целью повышения эффективности работы выходной системы компрессора его последний спрямляющий аппарат выполнен по двухрядной схеме с расчетным углом поворота потока 52° . При этом происходит снижение абсолютной скорости с 260 м/с до 120 м/с с коэффициентом восстановления полного давления $\sigma = 0,95$.

На рис. 2. показана линия изменения максимальных значений КПД спроектированного пятнадцатиступенчатого компрессора в зависимости от расхода воздуха через машину при исходном угле установки лопаток ВНА ($\Delta\alpha = 0^\circ$).

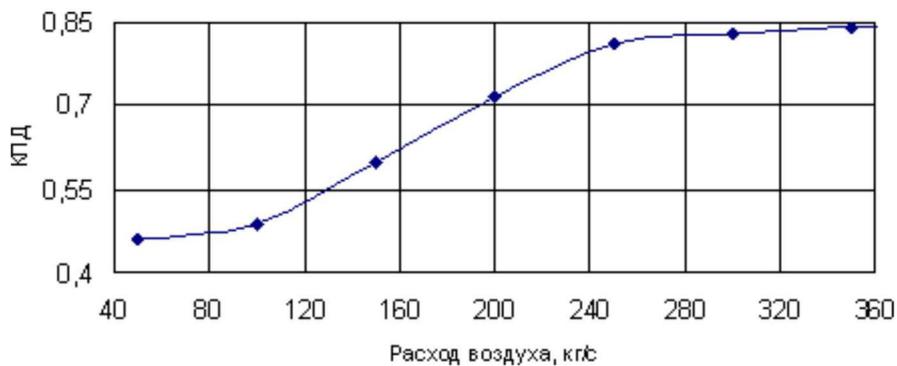


Рис. 2. График изменения максимального значения КПД компрессора ГТД – 110 при $\Delta\alpha=0^\circ$

Для обеспечения беспомпажного запуска двигателя кроме поворота лопаточных венцов ВНА применяется также перепуск воздуха после пятой и десятой степеней компрессора.

Суммарные газодинамические характеристики компрессора по линии запуска двигателя ГТД – 110 при $\Delta\alpha = -30^\circ$ и перепусках за пятой и десятой ступенями соответственно равными $\Delta G_5 = 4,5\%$ и $\Delta G_{10} = 13\%$ приведены на рис. 2. На этом же рисунке приведена также расчетная граница устойчивости с учетом экспериментальных данных по характеристикам первых семи и последних восьми ступеней и перепусках $\Delta G_5 = 9\%$ и $\Delta G_{10} = 16\%$. Для расчета положения границы устойчивости и анализа характеристик использовались моделированные экспериментальные характеристики группы первых семи ступеней при $\Delta\alpha = -25^\circ$ без перепуска за пятой ступенью, которые пересчитывались для различных величин перепуска, а затем суммировались с расчетно-экспериментальными характеристиками восьмой-пятнадцатой ступеней.

На этом рисунке показана и суммарная граница устойчивости как для перепуска воздуха исходного варианта ($\Delta G_5 = 4,5\%$ и $\Delta G_{10} = 13\%$), так и для отборов доработанного варианта ($\Delta G_5 = 9\%$ и $\Delta G_{10} = 16\%$). Из рис.2 следует, что граница устойчивости компрессора на режимах $n_{\text{пр}} = 1000...1700$ об/мин определяется запасами устойчивости первых ступеней. В случае перепуска с помощью доработанной системы за пятой и десятой ступенями при $\Delta G_5 = 9\%$ и $\Delta G_{10} = 16\%$ запасы устойчивости будут составлять $\Delta K_y = 10\%$ против $\Delta K_y = 5\%$ в исходном варианте ($\Delta G_5 = 4,5\%$ и $\Delta G_{10} = 13\%$). Дальнейшее увеличение запасов устойчивости компрессора на режимах $n_{\text{пр}} = 1000...1700$ об/мин можно получить введением перепуска за двенадцатой ступенью.

Проведенные расчеты показывают, что перепуск за пятой ступенью больший 9% не приводит к росту суммарных запасов устойчивости, что указывает на нецелесообразность дальнейшего увеличения перепуска в этом месте.

КПД компрессора при закрытом перепуске в камере сгорания и открытых клапанах за пятой и десятой ступенями с $\Delta G_5 = 4,5\%$ и $\Delta G_{10} = 13\%$ составляет $\eta_{\text{об}}^* = 0,815...0,83$. При этом запас устойчивости $\Delta K_y = 14\%$ на режиме $n_{\text{пр}} =$

2625 об/мин. Расчетный запас устойчивости с учетом экспериментальных данных по компрессору при $\Delta G_5 = 9\%$ и $\Delta G_{10} = 16\%$ на частоте вращения $n_{\text{нр}} = 2600$ об/мин составляет 25%.

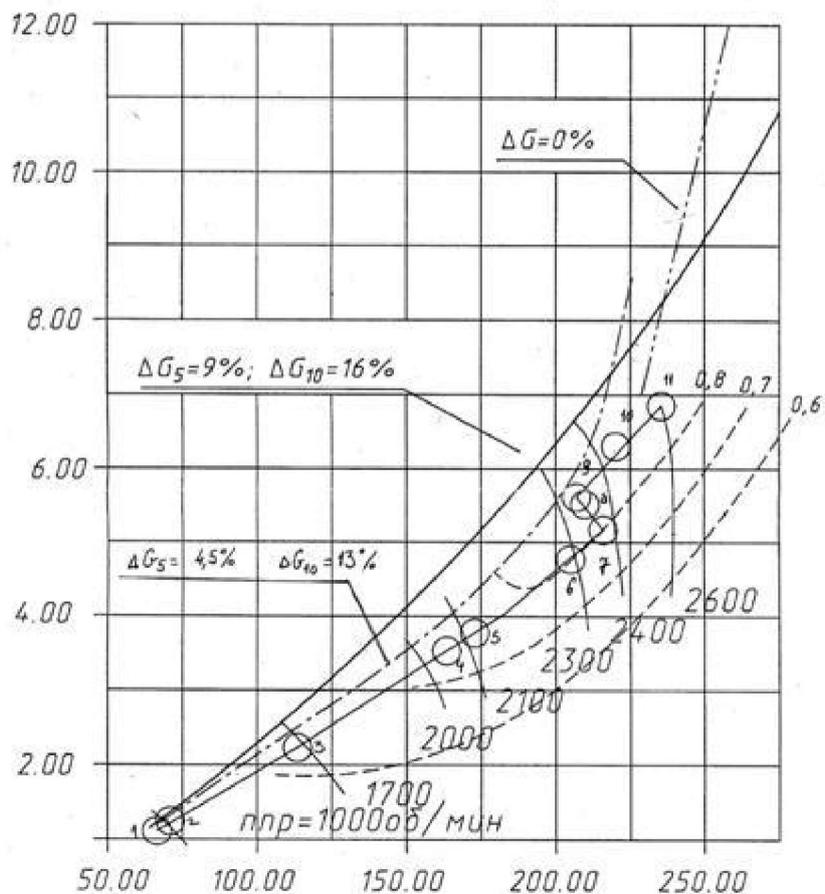


Рис. 3. Характеристика компрессора в системе ГТД – 110 на пусковых режимах

- — — Расчетная ГУР при $\Delta\alpha_{\text{ВНА}} = -30^\circ$ и $\Delta G_5 = 9\%$, $\Delta G_{10} = 16\%$
- · — · — Расчетная ГУР при $\Delta\alpha_{\text{ВНА}} = -30^\circ$ и закрытым перепуском за 5 и 10 ступенями
- · — · — Расчетная ГУР при $\Delta\alpha_{\text{ВНА}} = -30^\circ$ и $\Delta G_5 = 4,5\%$, $\Delta G_{10} = 13\%$

При закрытии клапанов перепуска за пятой и десятой ступенями расчетный запас устойчивости на частоте вращения 2600 об/мин составляет $A_c = 20\%$. Поэтому на режиме $n_{\text{нр}} = 2700$ об/мин целесообразно закрыть перепуск за пятой ступенью, а затем поэтапно закрыть перепуск за десятой ступенью, контролируя точку на компрессоре.

Суммарная характеристика компрессора, полученная экспериментальным путем в системе двигателя, показана на рис. 4.

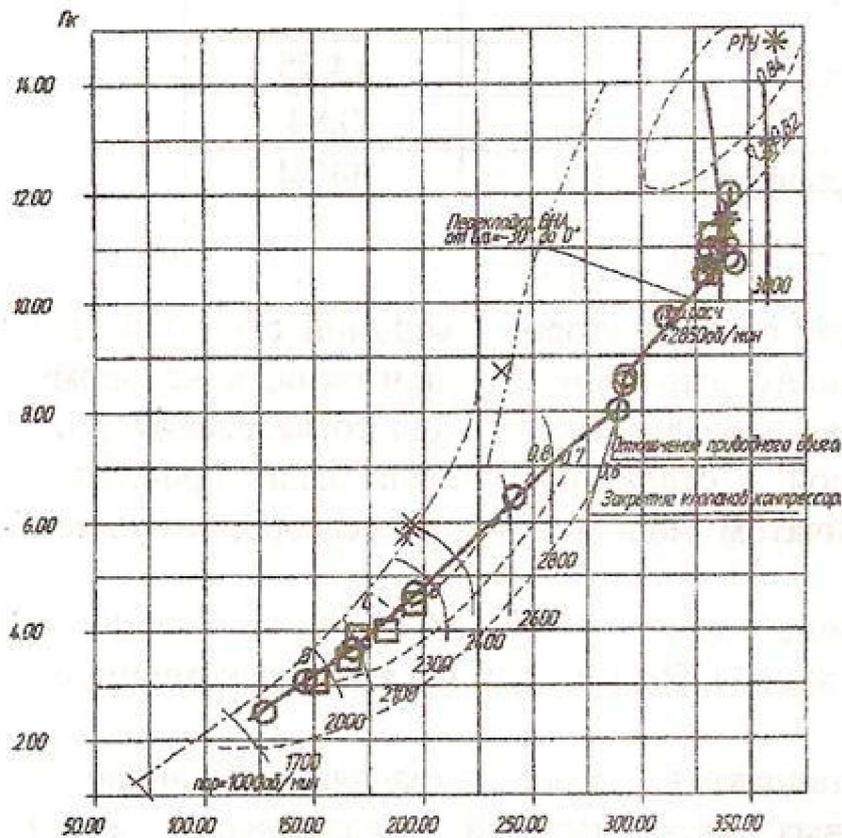


Рис. 4. Характеристика компрессора в системе двигателя ГТД – 110

Для выбора оптимальных углов установки входного направляющего аппарата (ВНА) и направляющих аппаратов первых двух ступеней использовался метод математического планирования в форме дробного факторного эксперимента с полурепликой 2^{3-1} [1]. Эти исследования КПД и отношения давлений выполнены в целях снижения материальных затрат на проведение физического эксперимента.

В качестве независимых переменных приняты углы поворота ВНА, НА-1 и НА-2.

Было также принято, что ступень слабо влияет на газодинамические характеристики соседних венцов при заданном шаге варьирования углов установки направляющих аппаратов. Нулевые уровни углов выбраны равными $\Delta\alpha_{\text{ВНА}} = -0,5$, $\Delta\alpha_{\text{НА-1}} = +1,5$, $\Delta\alpha_{\text{НА-2}} = -1,5$. Целевой функцией являлся суммарный КПД компрессора при коэффициенте запасов устойчивости $\Delta K_y = 15\%$. Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 2.

Таблица 2

Номер эксперимента	Числовые значения независимых переменных, град			Целевая функция $\eta_{\text{к}}$
	$X_1 = \Delta\alpha_{\text{ВНА}}$	$X_2 = \Delta\alpha_{\text{НА-1}}$	$X_3 = \Delta\alpha_{\text{НА-2}}$	
1	-5	+3	0	0,863
2	-8	+3	-3	0,859
3	-5	0	-3	0,867
4	-8	0	0	0,860

Расчетная модель была идентифицирована с экспериментальными данными при $n = 10000$ об/мин и $\Delta\alpha_{\text{ВНА}} = \Delta\alpha_{\text{НА-1}} = \Delta\alpha_{\text{НА-2}} = 0$. При полученном оптимальном сочетании углов установки $\Delta\alpha_{\text{ВНА}} = -5$, $\Delta\alpha_{\text{НА-1}} = 0$, $\Delta\alpha_{\text{НА-2}} = -3$ экспериментально проверен уровень КПД модельного компрессора. Использование методов планирования эксперимента позволило повысить КПД модельного семиступенчатого компрессора на 0,8% по сравнению с исходным вариантом.

Список литературы: 1. Стицын В.Е., Романов В.В., Шаровский М.А. Разработка и доводка многоступенчатого осевого компрессора двигателя ГТД 110/ Известия Инженерной академии наук, № 1, 1999, с. 160-163.

Поступила в редакцию 12.03.09