

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЬНОГО КОМПРЕССОРА ГТД-60

*Рассмотрены результаты опытных исследований семиступенчатого осевого компрессора одновальной газотурбинной энергетической установки ГТД-60 при различных вариантах поворота направляющих аппаратов с различными углами установки лопаточных венцов. Проанализированы запасы газодинамической устойчивости.*

### Вступление

Работы по созданию новой газотурбинной установки с номинальной мощностью 60 МВт (ГТЭ-60) для энергетики были начаты ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» в обеспечение государственных программ Минпромполитики, Минтопэнерго, утвержденных Кабинетом Министров Украины, связанных с сокращением потребления энергоресурсов [1,2]. К 2003 г. предприятие уже имело значительный опыт работы по созданию ГТД большой мощности. В Ивановской ГРЭС (РФ) были успешно проведены межведомственные испытания газотурбинной установки ГТД-110 мощностью 110 МВт (рис. 1), которая полностью подтвердила свои технические показатели.

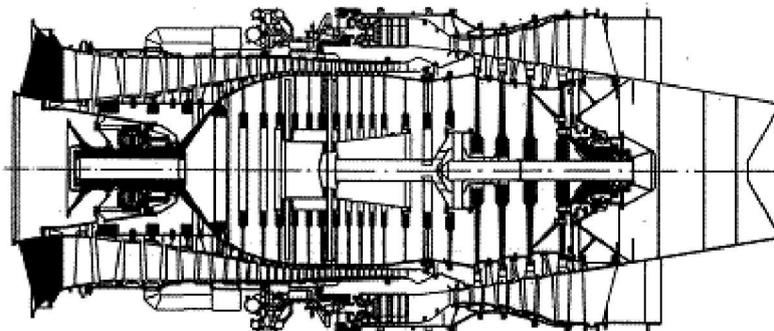


Рис. 1. Конструктивная схема энергетического ГТД-110

В качестве объекта исследования выбран модельный семиступенчатый осевой компрессор, который был сконструирован на основе шестиступенчатого натурального компрессора высокого давления изделия "99" с пристыкованной нулевой ступенью. Коэффициент моделирования равен 0,38.

### Постановка задачи.

С целью определения газодинамических характеристик натурального компрессора на пусковых режимах [3, 4] и выбора способе его регулирования (поворота направляющих аппаратов (НА) и перепуска воздуха) необходимо исследовать модельный компрессор в широком диапазоне режимов с определением запасов его устойчивой работы.

### Изложение основного материала

Экспериментальные исследования проведены на компрессорном стенде, в схеме которого предусмотрена следующая препарировка проточной части машины:

- в мерном цилиндре (ф 450 мм), расположенном на входе размещены три пятипоясные гребенки полного давления, разнесенные по окружности;
- в сечении перед входным направляющим аппаратом (ВНА) компрессора, расположенном после ресивера ( $L=1500$  мм), также установлены три пятипоясные гребенки полного давления и приемник статического давления на корпусе машины;
- за компрессором с осевым смещением установлены шесть четырехпоясных гребенки полного давления и восемь четырехпоясных приемники температуры заторможенного потока. Кроме того, здесь находятся приемник статического давления и тензометрические датчики, регистрирующие его изменения при приближении к границе устойчивой работы;
- в сечениях за первой и последней ступенями попарно установлены пятипоясные гребенки полного давления и соответствующие термпары, а также корпусные приемники статического давления.

Препарировка проточной части компрессора позволяет производить измерения углов выхода потока с помощью зондов-угломеров.

В номинальной точке модельный компрессор имеет следующие параметры при  $P_n=0,0$  101 МПа и  $T_n=288$  К:

- приведенный расход воздуха – 28,7 кг/с;
- степень повышения полного давления – 5,4;
- частота вращения – 10680 об/мин;
- изоэнтальпический КПД – 0,87.

Относительные погрешности определения основных параметров составили: частоты вращения – 0,01%; расхода воздуха – 1,2%; степени повышения давления – 0,66%; температуры на выходе из компрессора – 1%; полного давления на выходе из компрессора – 0,6%, КПД – 1,2%.

На первом этапе были исследованы газодинамические характеристики машины с тремя поворотными лопаточными венцами – ВНА, НА-1 и НА-2. При этом углы поворота аппаратов, полученные с помощью планирования факторного эксперимента, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение углов поворота лопаток трех лопаточных венцов

№ п/п	ВНА	НА-1	НА-2
-------	-----	------	------

1	-25 <sup>0</sup>	-20 <sup>0</sup>	-15 <sup>0</sup>
2	-20 <sup>0</sup>	-15 <sup>0</sup>	-10 <sup>0</sup>
3	-30 <sup>0</sup>	-15 <sup>0</sup>	-20 <sup>0</sup>
4	-20 <sup>0</sup>	-25 <sup>0</sup>	-20 <sup>0</sup>
5	-30 <sup>0</sup>	-25 <sup>0</sup>	-10 <sup>0</sup>

Экспериментальная характеристика модельного компрессора с тремя поворотными лопаточными венцами показана на рис.2.

Из анализа результатов следует, что максимальные запасы устойчивой работы при приемлемом КПД следуют при углах поворота лопаток  $\Delta\alpha = 25^0, 20^0, 15^0$ . Следует отметить, что по сравнению с исходным вариантом положения поворотных НА  $\Delta\alpha = -30^0, 0^0, 0^0$  запасы устойчивости на режиме  $n = 7500$  об/мин увеличились на  $\delta\Delta K_y = 5\%$ .

Указанный режим был выбран для сравнения, поскольку в аналогичном компрессоре ГТД - 110 минимальные запасы устойчивости были получены на этом режиме ( $n_{пр ГТД-110} = 2100$  об/мин).

На втором этапе были определены экспериментальные характеристики модельного компрессора с четырьмя поворотными аппаратами – ВНА., НА-1, НА-2 и НА-3. При этом углы установки регулируемых НА изменялись в соответствии с матрицей, приведенной в таблице 2.

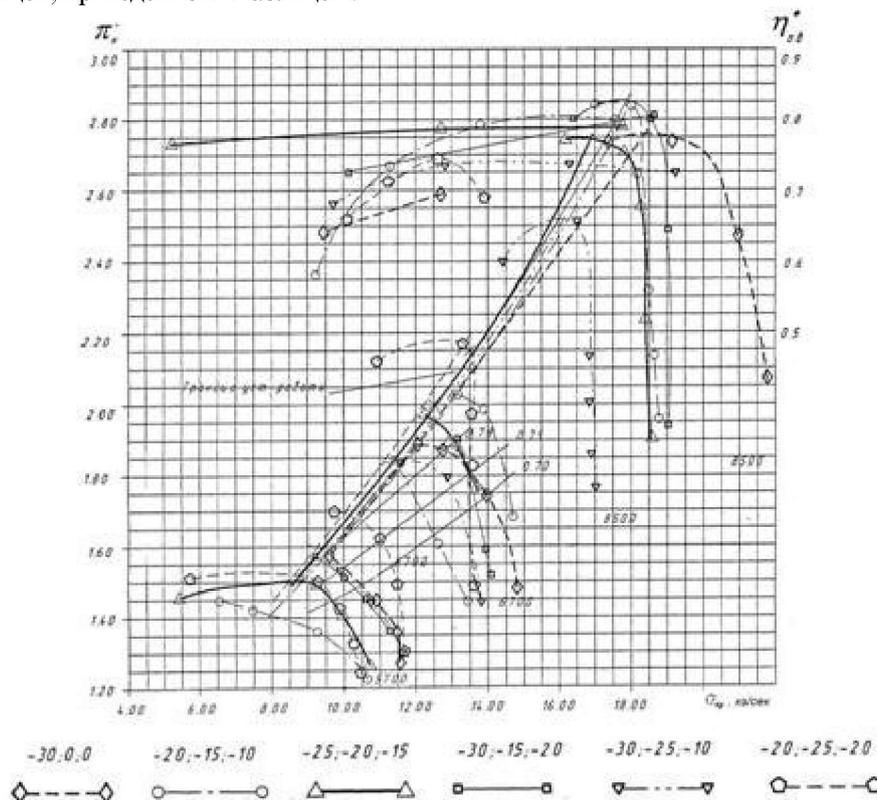


Рис.2. Экспериментальные газодинамические характеристики при трех поворотных лопаточных венцах  
Таблица 2 – Изменение углов поворота лопаток четырех лопаточных венцов

№ п/п	ВНА	НА-1	НА-2	НА-3
1	-25	-20	-15	-10
2	-30	-25	-20	-5
3	-20	-15	-10	-15
4	-30	-15	-20	-15
5	-20	-25	-20	-5
6	-30	-25	-10	-15

На рис.3. показаны экспериментальные характеристики компрессора при различных углах поворота лопаток четырех первых аппаратов.

Из рис. 3 следует, что максимальные запасы устойчивости на режиме  $n_{пр} = 7500$  об/мин получены при  $\Delta\alpha = -30^0, -25^0, -20^0, -5^0$ .

При введении поворота четвертого НА-4 увеличение запасов устойчивости в варианте с оптимальными углами установки равно  $\delta\Delta K_y = 9\%$  по сравнению с таким же вариантом при трех регулируемых НА, а увеличение запасов устойчивости, по сравнению с вариантом  $-30^0, 0^0, 0^0, 0^0$ , равен  $\delta\Delta K_y = 14\%$ .

В процессе разработки натурного компрессора ГТД-60 и идентификации расчетных характеристик с экспериментальными данными, было исследовано влияние количества регулируемых поворотных НА и величины перепуска воздуха за десятой ступенью на газодинамические характеристики машины. Расчетный анализ выполнен

при  $n_{пр} = 2000 \dots 2200$  об/мин для:

- исходного варианта регулирования компрессора  $\Delta\alpha = -30^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$  и отборами  $\Delta G_{за 5 ст} = 9\%$ ,  $\Delta G_{за 10 ст} = 16\%$ ;
- трех регулируемых поворотных НА при  $\Delta\alpha = -25^\circ, -20^\circ, -15^\circ$  и отборами  $\Delta G_{за 5 ст} = 9\%$ ,  $\Delta G_{за 10 ст} = 16\%$ ;
- четырех регулируемых поворотных НА при  $\Delta\alpha = -30^\circ, -25^\circ, -20^\circ, -5^\circ$  и перепуском  $\Delta G_{за 5 ст} = 9\%$ ,  $\Delta G_{за 10 ст} = 16\%$ ;
- четырех регулируемых поворотных НА при  $\Delta\alpha = -30^\circ, -25^\circ, -20^\circ, -5^\circ$  и отборами  $\Delta G_{за 5 ст} = 9\%$ ,  $\Delta G_{за 10 ст} = 8\%$ .

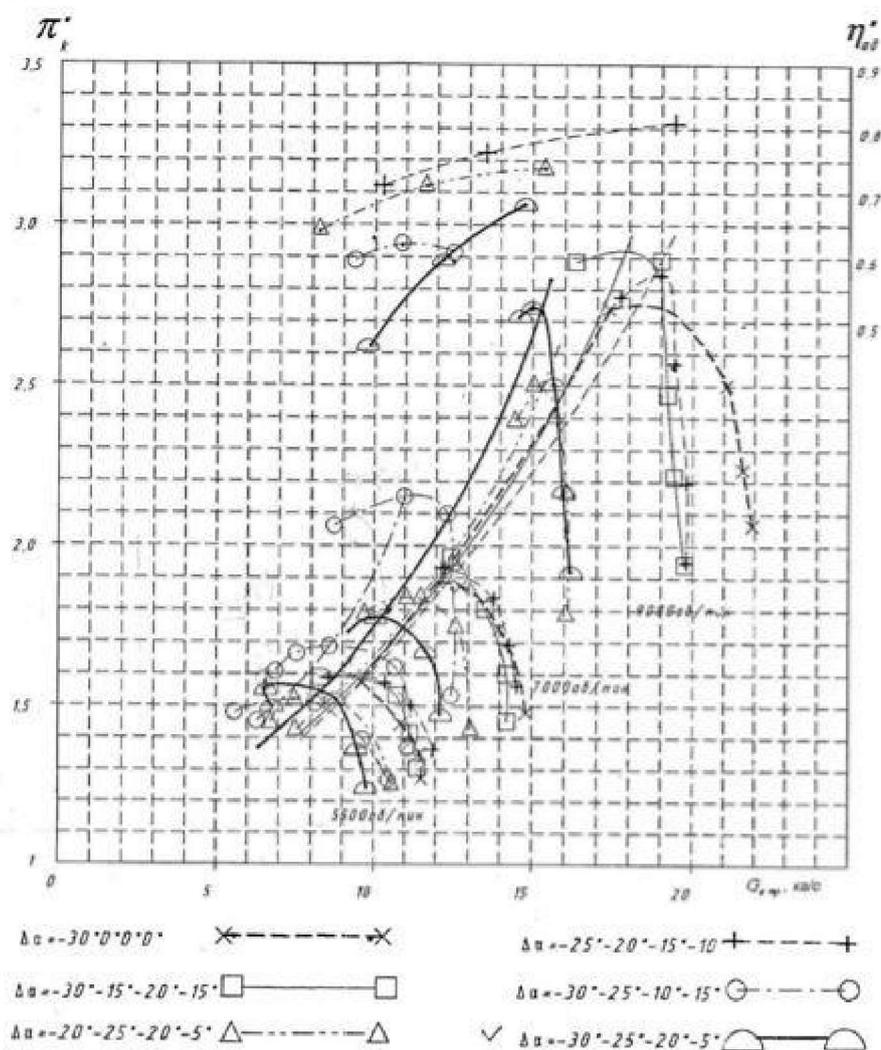


Рис.3. Экспериментальные характеристики компрессора при четырех поворотных венцах лопаточных аппаратов

Анализ зависимостей показывает, что при введении трех поворотных НА запасы устойчивости компрессора в указанном диапазоне увеличиваются на  $\delta\Delta K_y = 4\%$ , а при четырех регулируемых НА еще на  $\delta\Delta K_y = 8\%$ . При этом абсолютное увеличение  $\Delta K_y$  составляет 12%. Поэтому для четырех регулируемых НА с  $\Delta\alpha = -30^\circ, -25^\circ, -20^\circ, -5^\circ$  была дополнительно рассчитана возможность снижения величины перепуска за 10 ступенью с  $\Delta G_{за 5 ст} = 16\%$  до  $\Delta G_{за 10 ст} = 8\%$ .

Из полученных результатов следует, что в рассмотренном варианте без учета изменения положения линии рабочих режимов снижение перепуска за 10 ступенью на 1% уменьшает запасы устойчивости компрессора на 0,8%.

*Заключение.*

1. Полученные экспериментальные газодинамические характеристики модельного компрессора показывают, что в режиме  $n_{пр} = 7500$  об/мин минимальные запасы устойчивости при трех регулируемых НА ( $\Delta\alpha = -25^\circ, -20^\circ, -15^\circ$ ) выросли на 5% по сравнению с исходным вариантом с одним регулируемым ВНА ( $\Delta\alpha = -30^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ ).

2. При четырех регулируемых НА ( $\Delta\alpha = -30^\circ, -25^\circ, -20^\circ, -5^\circ$ ) минимальные запасы устойчивости дополнительно выросли на 9%, по сравнению с тремя поворотными НА, а, в целом, по сравнению с исходным вариантом увеличение  $\Delta K_y$  составляет 14%.

3. На основании полученных экспериментальных данных на модельном компрессоре предлагается в двигателе ГТД-60 ввести четыре поворотных регулируемых НА.

4. На основании полученных экспериментальных характеристик ступеней, с использованием расчетного метода их согласования получено, что при введении четырех поворотных НА можно уменьшить количество перепускаемого воздуха за 10 ступенью на пусковых режимах с 16% до 8%. При этом минимальные запасы устойчивости будут равны

$\Delta K_y = 8\%$ .

**Список литературы:** 1. Державна програма розвитку промисловості на 2003 – 2011 роки. Схвалено постановою Кабінету Міністрів України від 28 липня 2003 р. № 1174. 2. Енергетична стратегія України на період до 2030 року Схвалено постановою Кабінету Міністрів від 15 березня 2006 р. № 145. 3. Методология создания математической модели одновального двигателя ГТЭ-45/(60А) *И.Е. Аннопольская, В.А. Коваль, В.В. Романов*. Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2008. – № 34. – 136 с.

4. Ход работ по созданию новых газотурбинных установок. *Романов В.В., Раимов Р.И., Черный Г.В.* // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип.2. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2008. – 280 с.

*Поступила в редакцію 12.03.09*