

# ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПРЕССОРА СТАЦИОНАРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГТЭ-60 С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА АВИАЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Климнюк Ю. И., Чурсанов Г. Н.  
СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара  
Аронов Б.М.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара  
Беляев В.Е., Лопатин М.В., Скакунов Р. В.  
ОАО ЛМЗ, г. Санкт-Петербург

Известно, что разработчики стационарных энергетических установок весьма широко используют опыт специалистов, создающих авиационные газотурбинные двигатели. В их числе и высокоэффективные двигатели семейства НК, их компрессоры и турбины.

Опыт ОАО СНТК им. Н. Д. Кузнецова по проектированию и доводке осевых многоступенчатых компрессоров основан как на теоретических разработках своих высококвалифицированных специалистов, так и на богатом экспериментальном материале, полученном в процессе газодинамической доводки двигателей на высокие удельные параметры. Обобщение этого опыта привело к формированию методологии и к разработке программных средств, позволяющих в квазитрехмерной постановке (т.е. путем учета трехмерных эффектов через эмпирические зависимости) эффективно и целенаправленно вести проектирование и доводку компрессоров. Достигнутые высокие значения политропических КПД ( $\eta_{пол} = 0.9...0.91$ ) и остальных параметров компрессоров двигателей семейства НК получили известность не только среди специалистов в области авиации, но и у конструкторов стационарных ГТД.

На этом основании для решения одной из задач договора между СГАУ и Ленинградским металлическим заводом (ЛМЗ), а именно, задачи газодинамического анализа спроектированного на ЛМЗ компрессора ГТЭ-60, были привлечены специалисты отдела компрессоров СНТК.

В процессе расчетного анализа с использованием программы [1] установлено, что 16<sup>н</sup>-ступенчатый компрессор ГТЭ-60 спроектирован (основываясь на подходах, используемых в ЦКТИ), из условий постоянного напора по высоте лопаток. Анализ также показал, что недоучет трехмерности течения в проточной части компрессора и его значительно-го влияния в концевых частях лопаток привел к недоборам как степени повышения давления, так и запасов газодинамической устойчивости (ГДУ) на расчетном режиме и на режиме малой мощности. Недобор КПД

по расчетной оценке составил 1,5%.

Расчетные характеристики приведены на рисунках 1 и 2.

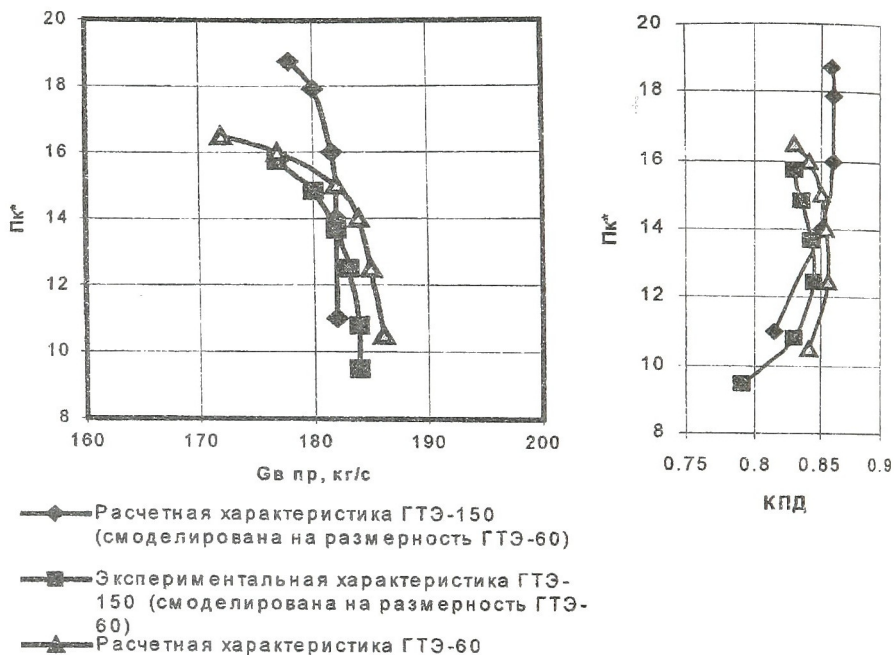
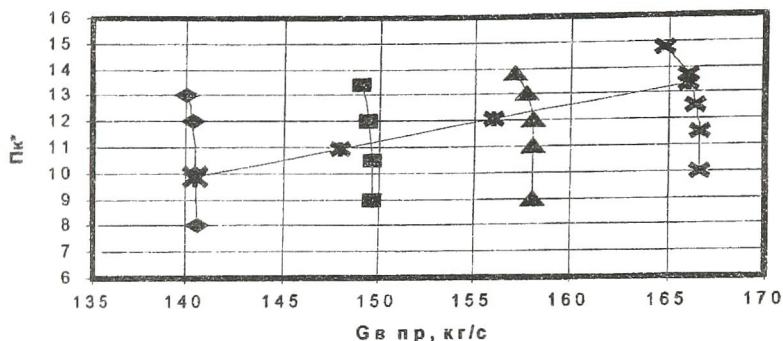


Рисунок 1 - Напорные характеристики компрессора установки ГТЭ-60.

На этом рисунке кроме характеристики ГТЭ-60 представлены расчетная и экспериментальная характеристики компрессора установки ГТЭ-150, смоделированные на размерность ГТЭ-60. Отмечается удовлетворительное согласование расчетной характеристики ГТЭ-60 с смоделированной характеристикой ГТЭ-150.

Анализ режимов ступеней компрессора показал, что углы атаки практически по всем венцам на  $5...9^\circ$  превышают оптимальные значения, что подтверждается и режимными параметрами  $A_7/A_1$ . Даже при коэффициентах скоростей  $\lambda = 0.75...0.8$ , в передних ступенях отмечаются кризисные явления в межлопаточных каналах. Полученные расчетные данные согласуются с данными по анализу параметров компрессора установки ГТЭ-150, выполненному ЦИАМ [2].

Отмеченные недостатки, на первый взгляд, не позволяют без коренной переделки получить заданные параметры компрессора. Действительно, для получения требуемой степени повышения полного давления



- ◆ Угол РНА= 30 град    ■ Угол РНА= 25 град    ▲ Угол РНА=20  
 ✕ Угол РНА=15 град    ✖ Рабочая линия

Рисунок 2 - Расчетная характеристика компрессора ГТЭ-60 по углу установки входного РНА при расчетной частоте вращения.

необходимо нагружать ступени, а это приведет к еще большим углам атаки в выходных ступенях и к еще большему снижению КПД и запасов ГДУ. Введение перепуска воздуха, хотя и позволяет получить требуемые запасы устойчивости, но при этом уменьшится степень повышения давления, увеличатся углы атаки в выходных ступенях, и снизится КПД.

Так как трехмерные эффекты существенно сказываются при сверхзвуковых скоростях набегающего потока, то особое внимание было обращено на первое рабочее колесо компрессора, где коэффициент скорости в относительном движении на периферии лопатки достигает значения  $\lambda = 1.15$ . Установлено, что конфигурация профилей пера лопатки не отвечает требованиям, предъявляемым при сверхзвуковом обтекании. Величина работы ступени меньше оптимальной. Это позволяет ее несколько подгрузить. Вместе с тем, для увеличения запасов ГДУ и улучшения прочностных свойств лопаток этого колеса рекомендовано применение надроторных перфорационных устройств, которые широко используются в двигателях НК.

Предварительный анализ течения в проточной части передней опоры показал, что в ней имеются резервы по снижению потерь. Но для этого потребуются проведение расчетов с использованием детальной геометрии канала и с привлечением дополнительных программных средств.

Анализ настройки ступеней показал, что при перепроектировании первой и второй ступеней с увеличением степени повышения полного давления в них и с разгрузкой выходных ступеней путем прикрытия 3, 4 и 5<sup>го</sup> регулируемых направляющих аппаратов возможно получение требуе-



мой степени повышения полного давления и КПД. Вместе с этим повышение напорности передних ступеней приводит к поднятию напорной характеристики компрессора, что должно обеспечить требуемые запасы ГДУ. Соответственно, для согласования двух первых рабочих колес потребуется перепроектировать и первый регулируемый направляющий аппарат.

Увеличенная степень диффузорности втулочной части 2<sup>го</sup> РНА может быть устранена увеличением хорды лопаток, что допустимо за счет некоторого уменьшения осевого межвенцового зазора.

Перечисленные мероприятия были подробно проработаны. Выполнена их предварительная прочностная оценка. Сравнение исходных и скорректированных параметров по высоте венцов приведено на рисунках 3...6, где

$$\overline{F}_{отн} = \frac{R_i^2 - R_{вт}^2}{R_{пер}^2 - R_{вт}^2},$$

$R_i$  – текущий радиус,

$R_{вт}$ ,  $R_{пер}$  – втулочный и периферийный радиусы соответственно.

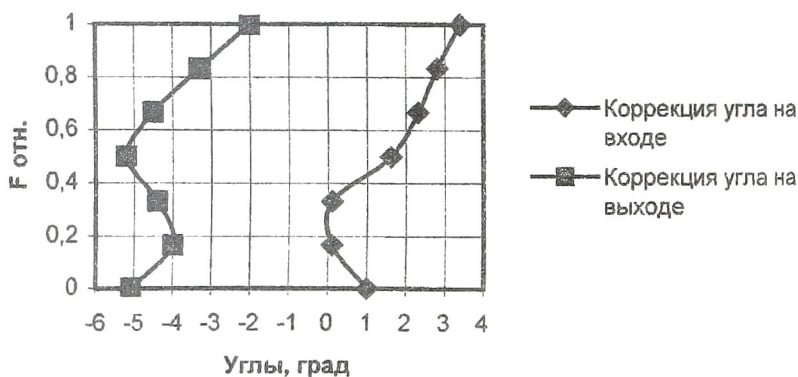


Рисунок 3 - Коррекция конструктивных углов 1 РК

На базе разработанной математической модели компрессора ГТЭ-60, по которой осуществлялся его газодинамический анализ, выполнена расчетная проверка перечисленных мероприятий. Установлено, что перепроектирование первых шести венцов с прикрытием 3..5<sup>го</sup> РНА позволит на проектном режиме получить заявленную степень повышения полного давления  $\pi_k^* = 15,6$  и КПД  $\eta_k^* = 0,865$  с обеспечением достаточных запасов ГДУ. При этом все эксплуатационные требования будут соблюдены также и на режиме минимальной мощности.



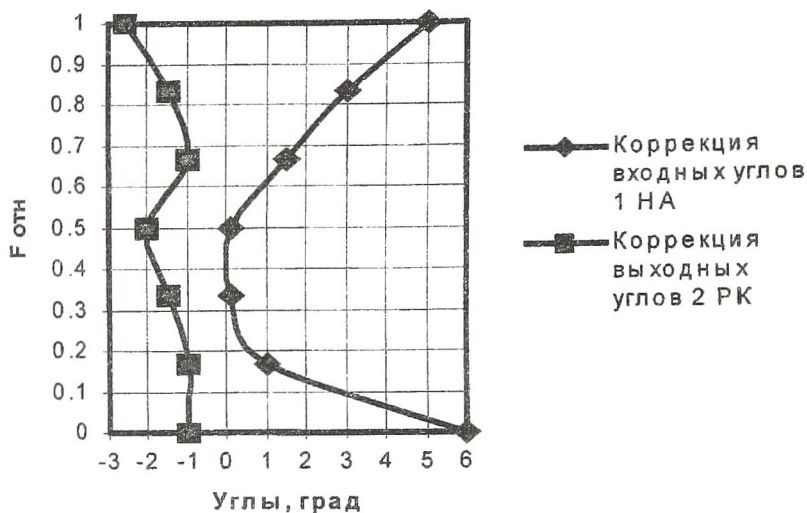


Рисунок 4 - Коррекция конструктивных углов 1НА и 2 РК.

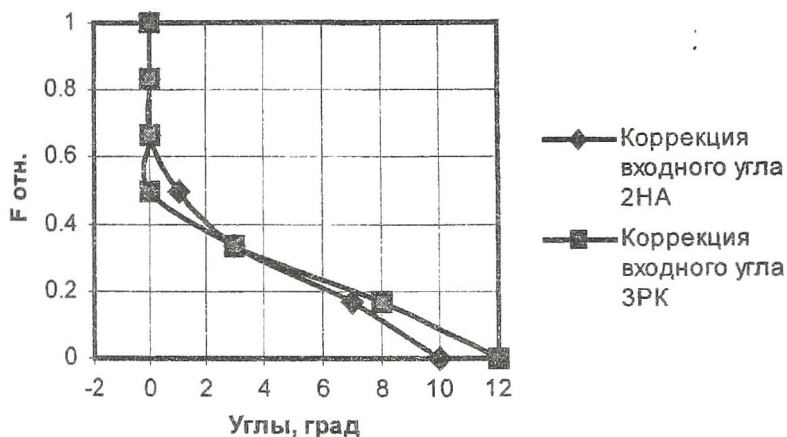


Рисунок 5 - Коррекция конструктивных углов 2НА и 3РК

Поскольку с результатами выполненного анализа и с намеченными мероприятиями специалисты ЛМЗ согласились, было решено реализовать их совместными усилиями специалистов СНТК и СГАУ. Коррекция геометрии профильных частей лопаток первых шести венцов с обеспечением требований к статической и динамической прочности выполняется в СНТК путем использования программ [3,], а соответствующая коррекция конструкций рабочих и направляющих лопаток, формирование моделей построения и выпуск чертежей – в ОНИЛ-18 СГАУ средствами комплексной САПР «Лопатка» [4].

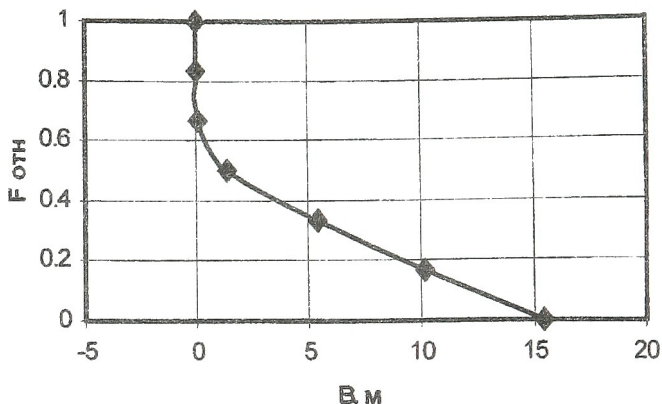


Рисунок 6-Коррекция хорды 2НА.

Полученный опыт комплексного решения столь сложной задачи будет использован при развитии и организации взаимодействия систем автоматизированного проектирования: газодинамических процессов в осевых компрессорах и конструкций лопаток рабочих колес и направляющих аппаратов. Об этом свидетельствует содержание недавно заключенного договора между СНТК, СКБМ и СГАУ. Специалистам этой «тройки» предстоит выявить и описать условия применения (алгоритмы) САПР лопаток на всех стадиях формирования новых конструкций компрессоров и их коррекции по результатам доводочных испытаний. На базе этих алгоритмов будут (в рамках упомянутого договора) модернизироваться и развиваться соответствующие программные и информационные средства.

#### Список литературы

1. Френк А.И., Федоровых Н.Н. "Газодинамический расчет венцов компрессора по высоте лопатки на ЭВМ ЕС-1033. Программа 1143", СНТК, технический отчет 001.5889, 1980г.
2. Тарабрин А.П., Комиссаров Г.А. и др. "Создание и отработка модели осевого компрессора для энергетической газотурбинной установки мощностью 150...200 Мвт". Новости техники и технологии. Компрессорная техника и пневматика. Вып. 1-2 (14-15), 1997г.
3. Скокова А.В., Стенькин Е.Д. "Расчет профилей лопатки по геометрическим параметрам решеток в плоских сечениях, интегральных характеристик профиля и расчет на прочность рабочих лопаток компрессора на ЭВМ ЕС-1033". Программа 1114, СНТК, технический отчет 001.5640, 1980г.
4. Автоматизация проектирования лопаток авиационных турбомашин (методология, алгоритмы, системы)/ Б. М. Аронов, В. А. Камынин, А. Г. Керженков и др. Под ред. Б. М. Аронова. М.: Машиностроение. 1994.