

УДК 621.452.3

И. А. КРИВОШЕЕВ, Д. А. АХМЕДЗЯНОВ, А. Е. КИШАЛОВ

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕССОРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГТД И ЭУ

Рассматриваются методы и средства, а также результаты создания новой информационной технологии системного проектирования и доводки компрессоров в составе авиационных ГТД и наземных газотурбинных установок. Описана методология имитационного моделирования компрессоров и унифицированный процесс получения и использования их характеристик. При этом используется разработанная в НИЛ САПР-Д УГАТУ инструментальная среда имитационного моделирования сложных объектов – МетаСАПР (Framework) САМСО и созданная на ее основе система моделирования (приложение) STUPENY. Проверка разработанной технологии проведена на примере компрессора высокого давления авиационного ГТД Р95Ш. *Авиационные двигатели; лопаточные машины; осевые компрессоры; характеристика компрессора; имитационное моделирование*

В соответствии с концепцией CALS (компьютерной поддержки жизненного цикла изделий) основной целью организации жизненного цикла ГТД является повышение эффективности за счет снижения издержек и увеличения полезного эффекта. Поэтому современная методология разработки конкурентоспособных авиационных двигателей направлена на сокращение суммарных затрат и сроков их создания путем широкого применения методов математического моделирования и параллельного проектирования, опережающей разработки НТЗ. На современном этапе в основе методологии создания двигателей и его узлов лежит интеграция систем имитационного моделирования, трёхмерного геометрического моделирования (САД), инженерного анализа (САЕ) и автоматизации изготовления (САМ). Расчетные методы совершенствуются путем развития так называемых междисциплинарных (многоаспектных) математических моделей [8] для всех стадий жизненного цикла и создания банков данных.

Совершенствование параметров, новые материалы, технологии и конструктивные решения, обеспечение требований проектирования привели к необходимости использования математических моделей расчета узлов и деталей ГТД, созданию новых математических моделей и методов решения нелинейных задач. Стремление сделать систему моделирования и формируемые модели инвариантными по отношению к многообразным и изменяющимся проектно-доводочным ситу-

ациям потребовало перейти от процедурной к объектной организации моделирования при проектировании как узлов, так и двигателя в целом [10].

### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\eta_K^*$  – КПД – коэффициент полезного действия компрессора;

$\pi_K^*$  – степень повышения давления компрессора;

$G_{впр}$  – приведённый расход воздуха через компрессор;

$m = \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{k}{R}}$  – коэффициент в формуле расхода газа;

$R$  – газовая постоянная;

$k$  – показатель изоэнтропии;

$F_{вх}$  – кольцевая площадь на входе в компрессор;

$\mu_{ВНА}$  – коэффициент расхода входного направляющего аппарата;

$\alpha_1$  – угол выхода потока из ВНА;

$u_{max}$  – максимальная окружная скорость;

$K_r$  – коэффициент «загромождения» кольцевого канала лопатками рабочего колеса первой ступени;

$\beta_{1л}$  – лопаточный угол в относительном движении на входе в РК первой ступени;

$c_p$  – удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении;

$n_{пр}$  – приведенная частота вращения ротора.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ КОМПРЕССОРОВ

Процесс проектирования и доводки компрессора можно разделить на ряд этапов, отличающихся содержанием и характером работ. В то же время такое деление весьма

условно, так как хотя этапы между собой и взаимосвязаны, но некоторые из них могут выполняться параллельно, что вполне отвечает современной концепции «параллельного проектирования», поддерживаемой системами типа PDM (Product Data Management).

Как и всякий процесс проектирования сложного узла, проектирование компрессора носит итерационный характер, в ходе которого от предварительных схем и упрощенных расчетов идет движение к реальному представлению об объекте с углублением проработки его основных характеристик и исследованием второстепенных особенностей. Создание компрессора неразрывно связано с созданием двигателя в целом, поэтому этапы проектирования компрессора входят как составная часть в известные стадии разработки ГТД. Подробно вопросы проектирования компрессоров изложены в [11].

Схематично процесс проектирования компрессора в виде последовательности выполнения расчетов представлен на рис. 1. В данном случае не использованы предусмотренные SADT-технологией (компьютерной поддержки создания систем) взаимно-вложенные формы PDEF, однако все они легко могут быть получены из приведенной интегральной схемы.

В настоящее время характеристики компрессоров получают различными способами [1, 2, 6, 12]. Наиболее надёжный и точный способ их определения — по результатам испытания на специальных стендах. Недостатками этого метода являются: необходимость специального оборудования (испытательные стенды, мультипликаторы), большие затраты энергии (для привода компрессора необходима мощность), необходимость иметь готовый компрессор (или его уменьшенную модель, которая в конечном итоге также даёт погрешность в связи с изменением относительных зазоров). Кроме того, на современном оборудовании невозможно получить характеристики в широком диапазоне — в области пониженных частот вращения, в зоне авторотации, «зуда», «помпажа» (не доводя компрессор до разрушения). Зону начала срыва потока со спинки лопатки также трудно обнаружить вследствие различий изготовления каждой лопатки, так как срыв со спинки одной конкретной лопатки может начаться раньше других. Таким образом, на этапе разработки характеристику компрессора получить затруднительно.

Второй способ — статистический анализ характеристик компрессоров (полученных при помощи эксперимента) и по обобщённым зависимостям с некоторой долей вероятности построение характеристики конкретного (в том числе вновь создаваемого) компрессора. Недостатком этого метода является то, что характеристики принципиально новых компрессоров, не охваченные статистикой, не могут быть получены. Кроме того, для удовлетворительной точности этого метода необходимо обработать большое количество характеристик различных компрессоров в широком диапазоне работы. Такого рода работы проводились в ЦИАМ им. П. И. Баранова, они свелись к выделению пяти групп компрессоров разной напорности, поскольку за базовую точку при «образмеривании» принималась точка с максимальным КПД.

В отличие от этого авторами данной статьи на основе результатов моделирования и теоретического анализа предложено безразмерную характеристику компрессора представлять в координатах

$$\begin{aligned} (\pi_K^* - 1)/(\pi_{KB}^* - 1) &= f_1(\bar{G}_{Впр}, \bar{n}_{пр}); \\ \bar{\eta}_K^* &= f_2(\bar{G}_{Впр}, \bar{n}_{пр}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\bar{\eta}_K^* = \eta_K^*/\eta_{KB}^*$ ;  $\bar{n}_{пр} = n_{пр}^*/n_{прБ}^*$ .

При этом в качестве базовой точки используется точка на границе помпажа на  $\Pi$  критическом режиме компрессора — когда одновременно в «горле» межлопаточных каналов на входе в РК I ступени и в кольцевом сечении на входе в I ступень скорость течения (соответственно в относительном и абсолютном движении) достигает скорости звука. Предложены аналитические выражения для определения расхода воздуха и частоты вращения (окружной скорости) на этом режиме:

$$\begin{aligned} G_{Впр\max} &= m\mu_{ВНА} F_{вх} \sin \alpha_1 \cdot 1,013 \cdot 10^5 / \sqrt{288}; \\ u_{\max} &= \left\{ 18,3 \cos \alpha_1 / (c_p \sqrt{288}) + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{[18,3 \cos \alpha_1 / (c_p \sqrt{288})]^2 - 2 / (c_p 288) [1 - 1 / (\sin \beta_{1л} K_\Gamma)^{1/3}]} \right\} \times \\ &\quad \times 2 / (c_p 288). \end{aligned} \quad (2)$$

При отсутствии ВНА (для компрессора с осевым входом)

$$u_{\max} = \sqrt{2c_p 288 [1 / (\sin \beta_{1л} K_\Gamma)^{1/3} - 1]}. \quad (3)$$

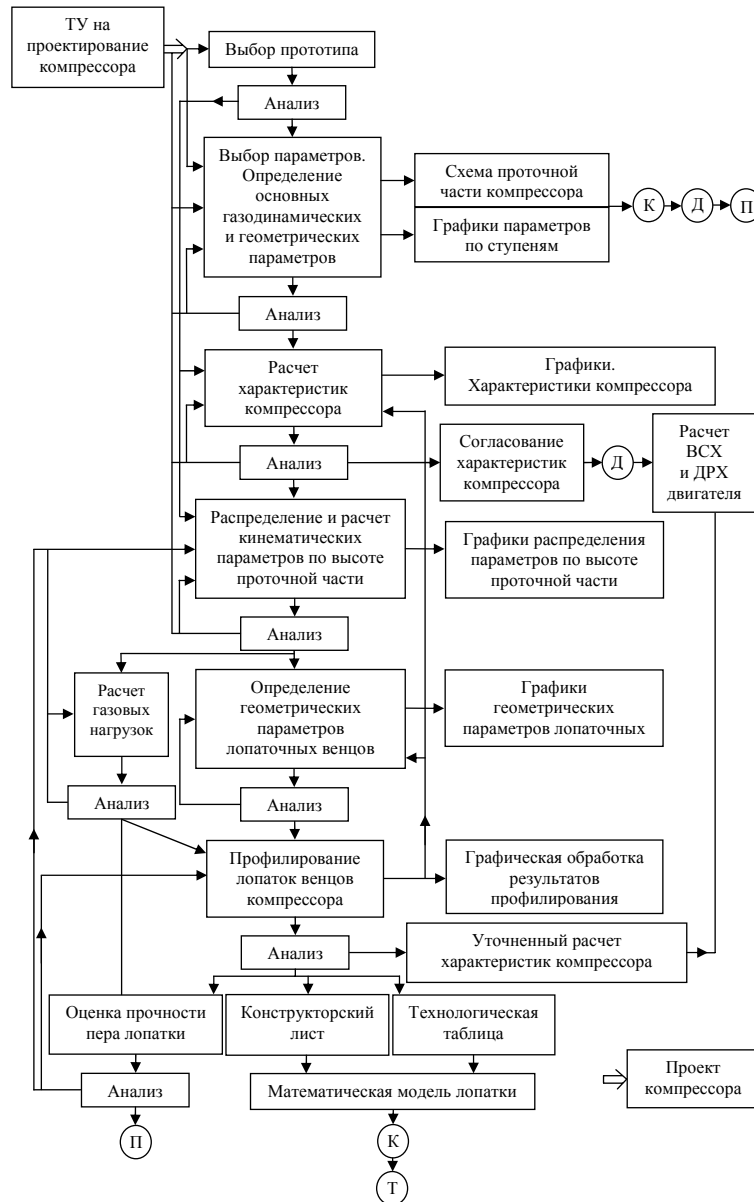
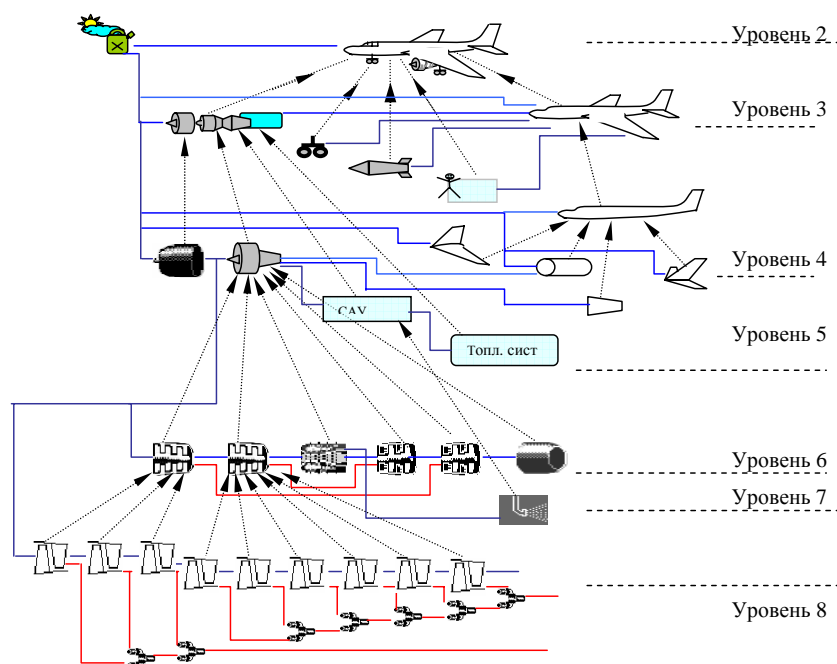


Рис. 1. Схема процесса проектирования компрессора: К — конструкторская проработка; Д — расчеты двигателя; П — прочностные расчеты; Т — турбина

Это позволяет представить характеристику практически любого компрессора в универсальном виде. Кроме того, моделирование и теоретический анализ позволил выявить ряд других закономерностей, позволяющих строить характеристики компрессоров в широком диапазоне (включая область начала раскрутки при запуске, авторотации при  $\pi_K^* \leq 1$ , отрицательного расхода воздуха при помпаже и даже отрицательной частоты вращения). Все это необходимо для выполнения имитационной моделью компрессора ее назначения — моделирования всех возможных ситуаций при работе компрессора и при его проектировании.

Третий способ — математическое описание процессов, происходящих в элементах компрессора. Достоинство метода — можно получить характеристики любого компрессора на этапе проектирования, доводки и эксплуатации. В данном направлении вели многочисленные разработки такие известные авторы, как К. В. Холщевников, Л. Н. Дружинин, А. П. Тунаков, О. Н. Емин, Р. М. Федоров и др.

В рамках CALS-технологии компьютерной поддержки жизненного цикла авиационных двигателей важную роль играют средства формирования, анализа и синтеза математических моделей ГТД и его узлов, гибко реализующих любые возможные схемы, программы



**Рис. 2.** Схема формирования многоуровневой имитационной модели ГТД в составе модели ЛА

регулирования и проектно-доводочные ситуации. На современном этапе развития информационных технологий и САПР авиационных ГТД используются сложные и дорогие интегрированные CAD/CAM/CAE-системы, способные моделировать трёхмерные течения в лопаточных турбомашинах. Так, например, в таких программных комплексах, как CFX, TascFlow, Fluid, Fluend, Flotran, FlowVision, KosmosFlowWorks и др., реализовано разбиение всей расчётной области на достаточно малые конечные элементы (или конечные объёмы), а затем последовательное решение дифференциальных уравнений Навье-Стокса для каждой ячейки с последующим объединением результатов. Такие системы дают достаточно точное решение для каждой точки расчётной области. Однако ни одна программа не решает дифференциальные уравнения Навье-Стокса напрямую, всегда пользуются определёнными численными методами, которые дают свою ошибку. Потому для каждого такого программного комплекса необходимо проводить верификацию для каждой конкретной задачи. Поэтому чаще реализуется моделирование отдельных межлопаточных каналов, отдельных ступеней в различных условиях работы, тогда как моделирова-

ние компрессора в целом — достаточно большая и сложная задача.

В разрабатываемой в НИЛ САПР-Д технологии, в отличие от перечисленных выше работ, в основу положен принцип имитационного моделирования в рамках системного проектирования двигателя, подробно описанный в работе [10]. Пример многоуровневой модели двигателя в составе модели ЛА показан на рис. 2.

В рамках этой концепции авторами разработана универсальная система имитационного моделирования (СИМ) компрессора произвольной схемы STUPENY [4], обеспечивающая параметрический и структурный синтез и анализ работы компрессора на этапах, предшествующих непосредственному процессу детального функционального и конструкторско-технологического проектирования.

Основой для формирования математических моделей компрессора в системе STUPENY является принцип имитационного моделирования, позволяющий реализовать физическое толкование и универсальность процесса формирования моделей компрессора и обеспечить ее связь с внешними условиями и с проектно-доводочной ситуацией. Предметной основой системы STUPENY служат:

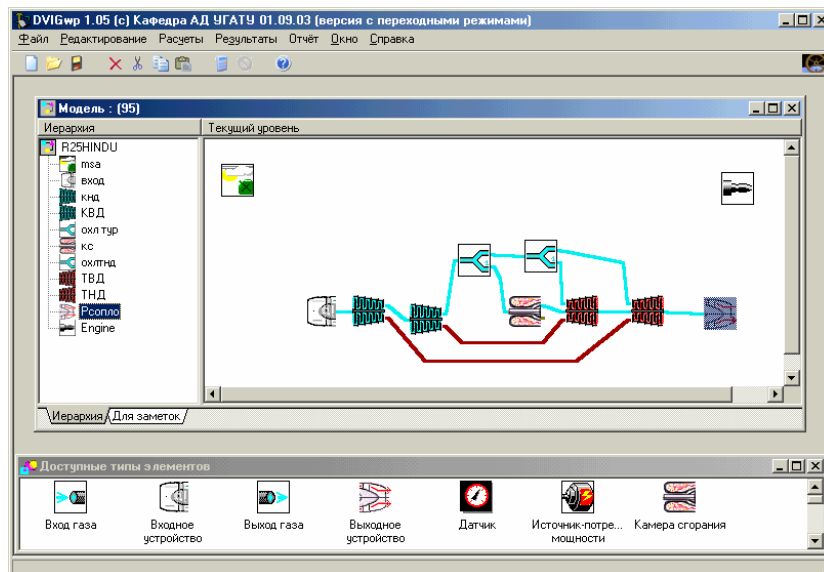


Рис. 3. Модель двухвального ТРД P95Ш в системе Dvlgwr (с детализацией на уровне узлов)

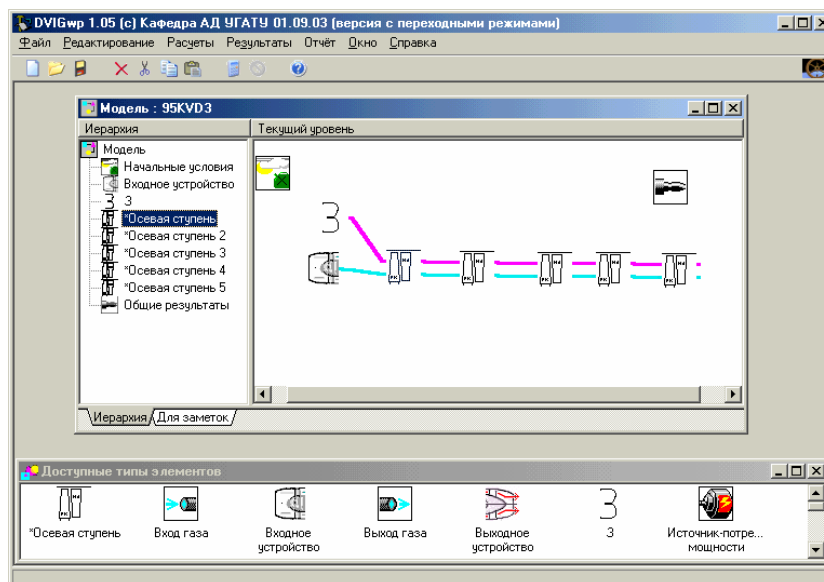


Рис. 4. Модель пятиступенчатого КВД двигателя P95Ш в системе STUPENY (с детализацией на уровне ступеней)

исходные модули (библиотека функциональных элементов), описывающие элементарные процессы в элементах компрессора в единых требованиях, обеспечивающих простоту их совместной работы в составе модели; условия совместной работы этих модулей, указываемые в графическом режиме; универсальные алгоритмы задания условий для различных проектно-доводочных задач.

Универсальные принципы синтеза термогазодинамических моделей базируются на условиях:

- выполнения закона сохранения вещества («неразрывности», т.е. баланса расходов рабочего тела);
- выполнения закона сохранения энергии (баланса механической мощности, теплового баланса);
- соблюдение условий, накладываемых решаемыми проектно-доводочными задачами.

В соответствии с названными исходными позициями алгоритм формирования имитационной модели компрессора будет состоять из следующих основных этапов:

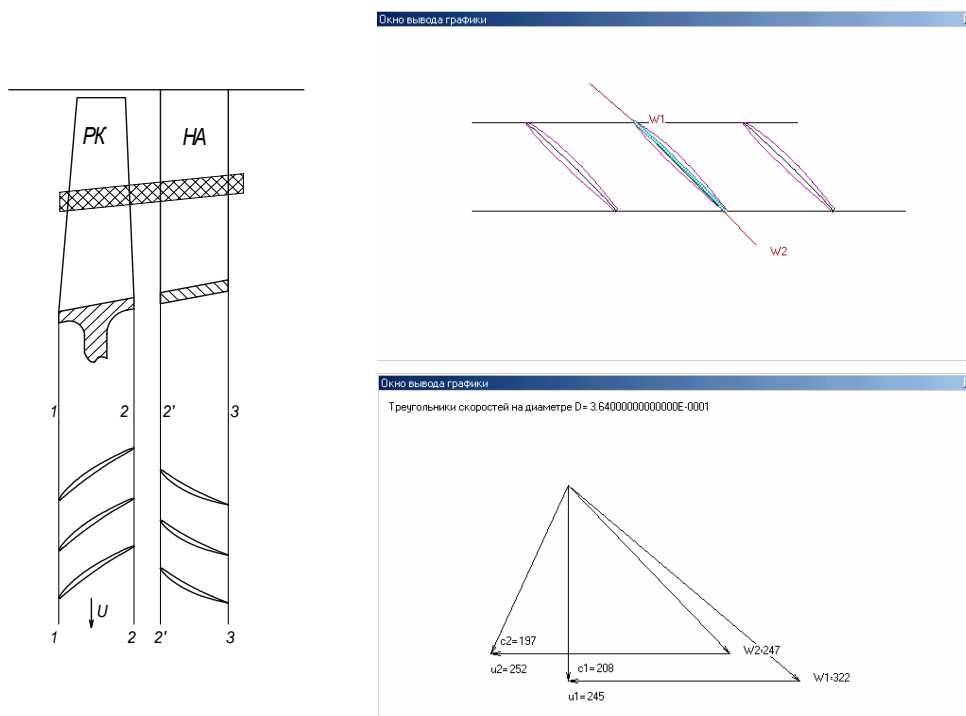


Рис. 5. Схема элементарной ступени компрессора и результат моделирования — треугольники скоростей, профили и межлопаточные каналы

- синтез модели путем ее набора из элементарных типовых модулей, определяющих выбранную схему;

- указание термогазодинамических и механических связей модулей (трассировка потоков);

- задание параметров, характеризующих условия работы модулей;

- задание условий, реализующих заданную проектно-доводочную задачу (формализованное построение системы управляемых невязок);

- задание условий для задачи многовариантного или многорежимного анализа или синтеза (с табуляцией параметров).

Так как система STUPENY предназначена для структурного и параметрического экспресс-анализа на ранних этапах проектирования, то в ней предусмотрена возможность решения задач в следующих типовых проектно-доводочных процедурах:

- формирование математической модели компрессора произвольной схемы в визуальном режиме;

- термогазодинамический расчет компрессора;

- определение «размерности» и геометрических параметров ступеней компрессора;

- расчет характеристик (ступеней, каскада и многокаскадного компрессора);

- профилирование лопаток;

- оптимизация законов изменения параметров вдоль проточной части;

- параметрическая и структурная идентификация математической модели компрессора;

- формирование произвольных запросов, отражающих типовые проектно-доводочные процедуры;

- выполнение набора сервисных процедур (пре- и постпроцессор).

В разработанной системе STUPENY предложена и реализована следующая методика [3]: компрессор представляется как набор ступеней (рис. 4), в каждом из которых на основании геометрии проточной части и межлопаточных каналов (рис. 5) рассчитываются характеристики каждой ступени (модель второго уровня, в отличие от базовой системы Dvigwp [5, 7, 9] первого уровня, в которой компрессор представлен как единый узел) (рис. 3). Рассчитанные характеристики каждой ступени «складываются» и получается общая характеристика компрессора (рис. 6–8).

Разработанная СИМ STUPENY позволяет получать характеристики компрессора во всем диапазоне режимов работы, в том числе в области авторотации, помпажа, зуда. С помощью данной СИМ можно смоделировать различную механизацию компрессора (сраба-

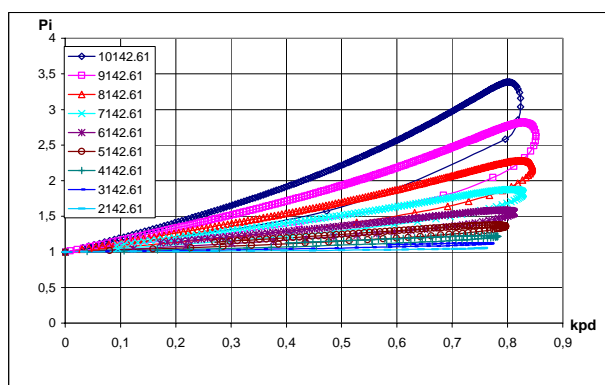


Рис. 6. Результат расчёта характеристики компрессора  $\pi_K^* = f(\eta_K, n_{np})$

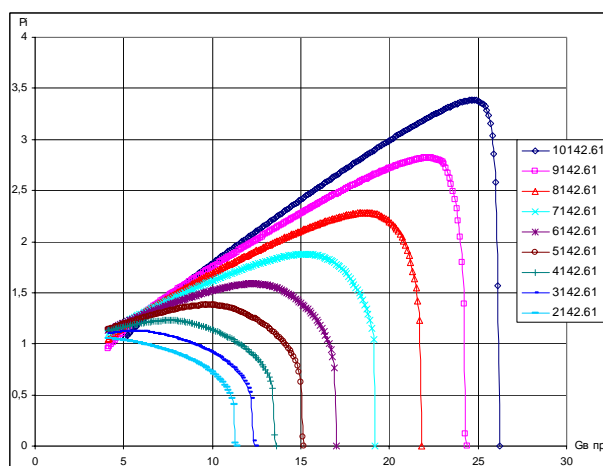


Рис. 7. Результат расчёта характеристики пятиступенчатого компрессора  $\pi_K^* = f(G_{впр}, n_{np})$

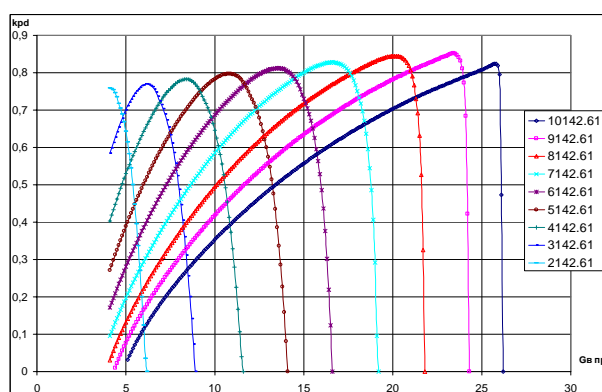


Рис. 8. Результат расчёта характеристики пятиступенчатого компрессора  $\eta_K^* = f(G_{впр}, n_{np})$

тывание клапанов и ленты перепуска, поворот входных направляющих аппаратов и т. д.). Для уже созданных компрессоров можно производить оптимизацию режимов работы и программ регулирования и каждой ступени в составе единого компрессора, а также исследовать влияние замены или добавления (удаления) одной из ступеней компрессора, изменение геометрии лопаток и корпуса компрессора. Такие задачи возникают при создании ГТП (для ГПА и электростанций, таких как НК-16, НК-38, АЛ-31СТ) на основе авиационных ТРДД и ТРДДФ (НК-8, НК-93, АЛ-31Ф). Для примера на рис. 7–8 представлены результаты расчёта характеристики пятиступенчатого компрессора (за основу взяты геометрические параметры КВД двигателя Р95Ш).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система моделирования STUPENY демонстрирует эффективность развиваемого авторами подхода к решению

проектно-доводочных задач по созданию компрессоров в рамках авиационных и наземных ГТД и ГТУ. В частности, показаны возможности построения характеристик компрессора при заданной геометрии проточной части и лопаточных венцов. На данном этапе это сделано по среднему диаметру компрессора. При этом не учитывалась неравномерность параметров потока по высоте. Достаточная адекватность такого моделирования обеспечивается для сравнительно коротких лопаток (компрессоров высокого и среднего давления). При расчете вентиляторов ТРДД, первых ступеней ТРД требуется учет неравномерности параметров по высоте лопатки. Кроме того, это необходимо для профилирования лопаток по высоте. В связи с этим ведется работа по усложнению разработанной системы моделирования. Очевидно, при расчёте каждого лопаточного венца по высоте (и передаче этих параметров по «потокам»), расчёт каждой точки характеристики значительно усложнится, но и результирующая характеристика будет более точной. Предполагается

также значительное усложнение программы при производстве уточнения течения в межлопаточном канале — расчёт пограничного слоя и связанных с этим режимов обтекания профилей. При этом можно будет достаточно точно обнаружить начало срыва потока со спинки — найти граничную точку на каждой напорной ветке на характеристике компрессора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теория**, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок : учебник / под ред. В. А. Сосунова, В. М. Чепкина. М. : МАИ, 2003. 688 с.
2. **Холщевников, К. В.** Теория и расчет авиационных лопаточных машин : учебник для вузов. 2-е изд. / К. В. Холщевников, О. Н. Емин, В. Т. Митрохин. М. : Машиностроение, 1986. 432 с.
3. **Ахмедзянов, Д. А.** Получение характеристик осевых компрессоров / Д. А. Ахмедзянов, А. Е. Кишалов // Современные проблемы расчета, проектирования и производства АТ : тр. НТК. Уфа, 2006. Т. 2. С. 16–20.
4. **Ахмедзянов, Д. А.** Система имитационного моделирования лопаточных машин в составе газотурбинных двигателей : свид. об офиц. рег. / Д. А. Ахмедзянов, И. А. Кривошеев, А. Е. Кишалов. № 2006610257. М. : Роспатент, 2006.
5. **Ахмедзянов, Д. А.** Система термогазодинамического моделирования газотурбинных двигателей на переходных режимах работы DVIGwp : свид. об офиц. рег. / Д. А. Ахмедзянов, И. А. Кривошеев, Е. С. Власова. № 2004610868. М. : Роспатент, 2004.
6. **Абрамович, Г. Н.** Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. М. : Наука, 1976. 888 с.
7. **Проектирование** авиационных газотурбинных двигателей : учебн. для вузов / под ред. проф. А. М. Ахмедзянова. М. : Машиностроение, 2000. 454 с.
8. **Чуян, Р. К.** Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов / Р. К. Чуян. М. : Машиностроение, 1988. 288 с.
9. **Ахмедзянов, Д. А.** Термогазодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGw / Д. А. Ахмедзянов, И. А. Кривошеев, Х. С. Гумеров [и др.]. Уфа : УГАТУ, 2003. 162 с.
10. **Кривошеев, И. А.** Автоматизация системного проектирования авиационных двигателей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И. А. Кривошеев. Уфа : УГАТУ, 2000. 34 с.
11. **Проектирование** авиационных газотурбинных двигателей : учебн. для вузов / под ред. проф. А. М. Ахмедзянова. М. : Машиностроение, 2000. 454 с.
12. **Ржавин, Ю. А.** Осевые и центробежные компрессоры двигателей математических аппаратов / Ю. А. Ржавин. М. : МАИ, 1995.