

УДК 621. 525: 621. 452. 3 (075)

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.И. Белоусов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

aibelousov@mail.ru

Аннотация

В статье анализируется конструктивная схема изделия, в значительной степени определяющая параметры его технического совершенства и надёжности, как концепция его конструкции и концептуальные вопросы, связанные с процессом выбора конструктивной схемы изделия на этапе эскизного проектирования. Особенности этого процесса на основе системного подхода иллюстрируются на примере турбонасосного агрегата двигателей летательных аппаратов, конструктивная схема которого определяется параметрами и структурными элементами самого агрегата, двигателя и летательного аппарата, для которого проектируется двигатель. Подчёркивается необходимость учёта взаимосвязи структуры и свойств изделия. Показано, что проектирование изделий новой техники идёт по пути преодоления диалектических противоречий между растущими научно-техническими потребностями и возможностями существующего поколения изделий. В порядке обобщения проведённого анализа сформулированы принципы выбора конструктивных схем изделий на этапе эскизного проектирования.

Ключевые слова: конструктивная система, конструктивная схема, структурные элементы, изделие, конструкция, структура конструкции, турбонасосный агрегат, двигатели летательных аппаратов.

Введение

В двигателях летательных аппаратов (ДЛА), жидкостно-ракетных (ЖРД) или авиационных газотурбинных (ГТД), совокупность лопаточных машин как источников давления (напора) компонентов топлива (окислителя и горючего) с турбинным приводом называется турбомашинной. В ГТД окислителем является кислород воздуха, турбиной приводится компрессор, а турбомашинная называется турбокомпрессором. В ЖРД используются жидкие компоненты топлива, поэтому турбиной приводятся насосы, а турбомашинная называется турбонасосным агрегатом (ТНА). Если в качестве горючего ГТД используется жидкий водород или сжиженный природный газ, то для подачи их в камеру ГТД применяется также ТНА.

Итак, ТНА в простейшем случае состоит из турбины, насосов горючего и окислителя, которые назовём *структурными элементами* (СЭ). Совокупность взаимодействующих СЭ образует *конструктивную систему* изделия (в рассматриваемом случае - ТНА). Графическим отображением конструктивной системы изделия является *конструктивная схема*. Конструктивной схемой (КСх) называется условное графическое изображение конструктивной системы, характеризуемое типом, количеством, взаимным расположением и взаимосвязями СЭ [1].

Создание высокоэффективного ТНА является важной и сложной научно-технической задачей. В связи с резким ростом энергонапряжённости ДЛА предъявляются всё более жёсткие требования к агрегатам подачи топлива, в значительной степени определяющим энергомас-

совое совершенство и надёжное функционирование двигателя. Это подтверждает опыт создания высокоэффективных отечественных ЖРД для ракеты-носителя (РН) Н-1 (НК-33) и ракетно-космического комплекса (РКК) «Энергия-Буран» (РД-170 и РД-0120), а также двигателя SSME многоразовой космической системы «Space Shuttle». Предельно высокие энергетические параметры ТНА (давление за насосами до 70 МПа, температура химически активного газа перед турбиной до 1000 К, окружная скорость вращения ротора до 650 м/с, удельная мощность турбины до 240 кВт/кг, требования по обеспечению многократности испытаний и включений в полёте) потребовали в процессе разработки этих двигателей решения целого ряда сложнейших научных, конструкторских, материаловедческих, технологических и эксплуатационных проблем.

В 1962 г. в Куйбышевском ОКБ под руководством Генерального конструктора авиационных и ракетных двигателей Н.Д. Кузнецова началась разработка самых мощных на то время кислородно-керосиновых ЖРД тягой 150...180 тонн (1,47...1,76 МН) для первой и второй (а меньшей тяги – для третьей и четвертой) ступеней сверхтяжёлой РН Н-1. Этот носитель предназначался для пилотируемых и непилотируемых полётов на Луну и к планетам Солнечной системы. Опыт разработки и доводки этих двигателей (1962 ... 1974 г.г.) позволил академику Н.Д. Кузнецову сделать вывод о *ключевой роли ТНА в создании мощных ЖРД* [2].

После закрытия в 1974 г. проекта Н-1 фирма Аэроджет (США) провела испытания ЖРД НК-33 и, убедившись в перспективности принятой КСх ТНА и заложенных при проектировании параметров двигателя, купила в 1997-99 гг. более 40 ЖРД для установки на разрабатываемые в США ракетные системы многоразового использования.

Решение отмеченных выше проблем в ходе отработки в КБ «Энергомаш» (г.Химки) для первой ступени РКК «Энергия-Буран» самого мощного ЖРД РД-170 тягой 740 тонн (7,25 МН), использующего в качестве топлива жидкий кислород и керосин, и созданного в КБХА (г. Воронеж) самого крупного среди кислородно-водородных двигателей РД-0120 тягой 200 тонн (1,96 МН) для второй ступени этого РКК было связано, в частности, с предельно высокими значениями параметров практически всех СЭ ТНА, новизной многих решений и недостаточным научно-техническим заделом по разработкам основных СЭ ТНА. Это явилось одной из причин большого числа отказов при испытаниях ЖРД по вине ТНА (до 75 % отказов) и привело к значительному увеличению требуемого количества материальной части, сроков и стоимости отработки двигателей [3].

Работы по ТНА являются узким местом по времени на всех этапах создания двигателя – при проектировании, изготовлении первых образцов, автономных доводочных испытаниях, доводочных испытаниях в составе двигателя, серийном изготовлении и т.д. От того, насколько тщательно выбрана КСх и выполнены все проектные работы по ТНА на основе этой схемы, насколько правильно построена методика его отработки, в значительной степени зависят надёжность двигателя, возможность сокращения сроков каждого из этапов работ и, в конечном счёте, сроки создания двигателя.

В настоящей статье анализируются и увязываются в единую систему факторы, условия и принципы проектирования КСх ТНА ДЛА, что означает попытку *обоснования онтологического подхода* к реализации вопросов, вынесенных в название статьи. ТНА рассматривается здесь как *предмет исследования*, подчёркивая, что изложенное ниже может быть применимо для любого класса изделий с учётом их особенностей.

1 Особенности выбора конструктивных схем ТНА

Выбор КСх является начальным этапом проектирования ТНА. Проектировщик принимает решение в условиях неопределённости (дефицита информации), когда отсутствуют чёткие

закономерности при выборе типа схемы. Предпочтения, которые он оказывает альтернативам, исходя из своего опыта, выражаются не в виде формул, а прототипа, высказываний, эмоций и т.д. При этом необходимо учитывать не только предполагаемую конструкцию и требуемые параметры работы ТНА, которые однозначно определяются КСх, но и параметры летательного аппарата (ЛА), а также влияние на них КСх ТНА, т.е. вести проектирование системно. Например, для уменьшения массы ТНА необходимо увеличивать скорость вращения его ротора. Но при этом требуется повышенное давление на входе в насос для предотвращения кавитации в нём, т.е. увеличение давления в баке, что утяжеляет его. Это противоречие стимулирует поиск новых конструктивных схем ТНА, поэтому появились выносные преднасосы, играющие роль подкачивающего (бустерного) ТНА (БТНА), и ТНА двухкаскадных схем. В последнем случае один каскад ТНА (преднасос) вращается со сравнительно низкой скоростью, обеспечивающей бескавитационную работу его и высокооборотного насоса второго каскада, скорость вращения которого выбирается из условия обеспечения минимальной массы конструкции.

БТНА устанавливается перед основным ТНА. Их КСх определяются также степенью ракеты. В ЖРД нижних ступеней БТНА целесообразно компоновать вблизи основного ТНА или на нём для использования больших инерционных подпорков и выработки компонента в длинной трубе, соединяющей бак с двигателем. Для верхних ступеней инерционный подпор и длина труб невелики, поэтому БТНА устанавливают у бака. Это, естественно, приводит к тому, что КСх основного ТНА и БТНА нижних и верхних ступеней могут отличаться, например, типом преднасосов и основных насосов (применяются осевые, шнековые или пропеллерные, диагональные, центробежные, шнекоцентробежные), турбин (активные и реактивные, газовые и гидравлические, осевые, радиальные центробежные и центростремительные), количеством ступеней насосов и турбин. При проектировании ТНА необходимо учитывать также время и режимы работы ДЛА и ТНА, кратность его включения в полёте, частоту вращения ротора (роторов), свойства и параметры рабочих сред насосов и турбин по режимам, условия работы роторных уплотнений и герметизаторов по разъёмам, их взаимосвязи и влияния и т.д.

Задача выбора КСх ТНА является большей частью задачей *структурного синтеза* (определения состава ТНА и установления связей между его СЭ). Системы, ориентированные на задачи структурного синтеза, позволяют формализовать знания и опыт экспертов, тиражировать его, существенно облегчая работу как рядового специалиста, так и самого эксперта.

Формально синтез КСх ТНА можно определить как процесс получения (выбора) некоторого частного решения по конкретным значениям параметров (условий), определяющих этот выбор. В основе автоматизированного решения этой задачи лежит алгоритм, относящийся к классу алгоритмов выбора решения [4]. Но при проектировании необходимо улучшать технические системы, технологии, конструкционные материалы, т.е. вносить в проект элементы новизны. Это предопределяет необходимость решения *изобретательских задач* [4 - 6].

Таким образом, ценность проектных решений определяется учётом огромного числа факторов, их новизной и сочетаний. Следовательно, проектирование современных изделий возможно только при использовании системного подхода.

2 Конструкция и её структура

2.1 Взаимосвязь структуры и свойств изделия

С позиций системного подхода конструкция (абстракция, условное изображение) изделия (материальная конкретность) рассматривается нами [7] как категория, формирующая

Носителями определённых свойств изделия и связей между ними являются структурные элементы. Под типом СЭ может рассматриваться любой элемент конструкции в зависимости от поставленной цели и решаемой задачи.

СЭ выделяются методом декомпозиции, т.е. разделением системы (в нашем случае – конструктивной системы) на подсистемы - на СЭ. Каждая подсистема имеет свои локальные свойства и структуру. Способность ставить их в определённые взаимоотношения, т.е. влиять на формирование внешней и внутренней структур изделия и их состояний (см. рисунок 1), является основной особенностью всех подсистем – СЭ.

Декомпозиция может осуществляться как по уровням структуры-иерархии рассечением вертикальных связей, так и на одном уровне рассечением горизонтальных связей.

При декомпозиции по вертикали (см. рисунок 2) СЭ нулевого уровня является комплекс сборочных единиц (СЕ) или изделие (в рассматриваемом случае – ТНА), первого уровня – СЭ или комплекс СЕ (например, бустерный ТНА или шнекоцентробежные насосы горючего и окислителя, турбина) и т.д.

При декомпозиции уровня, т.е. по горизонтали, изображённой на рисунке 3, вначале выделяются СЭ по ФН (этап А), затем СЭ рассматриваемого i -го уровня данного ФН m разделяются по классификационному признаку (свойству) s . Это и есть классификация СЭ одного ФН.

Уровни	Отношения СЭ между уровнями	Объект декомпозиции, тип СЭ	Обозначение КСх
0	$(СЭ)_0$	Изделие, комплекс СЕ: ТНА	$ K _0$
1	$(СЭ)_1 \in (СЭ)_0$	СЭ, комплекс СЕ: ШЦБНО, ЦБНГ, Т, ...	$ K _1$
$i-1$	$(СЭ)_{i-1} \in (СЭ)_{i-2}$	Деталь: лопатка, диск, вал, ...	$ K _{i-1}$
i	$(СЭ)_i \in (СЭ)_{i-1}$	СЭ в детали с отдельным ФН: фланец, шлицы, ...	$ K _i$
n	$(СЭ)_n \in (СЭ)_{n-1}$	СЭ последнего уровня декомпозиции: поверхность, фаска, галтель, ...	$ K _m$

Рисунок 2 - Уровни декомпозиции СЭ

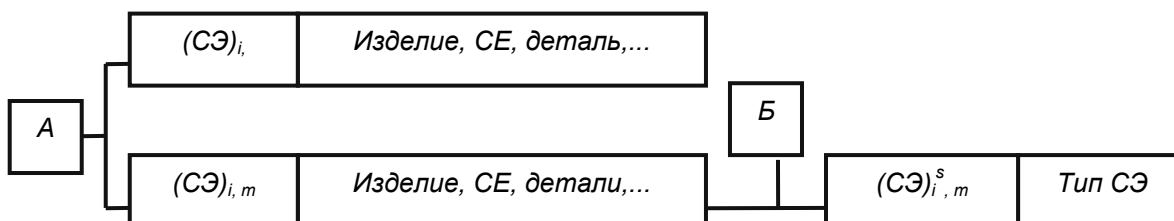


Рисунок 3 - Блок-схема декомпозиции уровня

2.2 Итерационный характер проектирования

Для значительного комплекса свойств-связей практически невозможно сформировать структуру конструкции в один подход. Этим (совместно с уровневым характером структуры конструкции и недостатком исходной информации) объясняется итерационный характер проектно-конструкторского и технологического процессов, а также необходимость при создании изделия самого трудоёмкого и затратного этапа - доводки.

Следовательно, проектирование изделий новой техники можно сравнить образно с постоянным достижением развилки, на которых нет указателей. Тем важнее с ранних стадий проектирования необходимость глубокой научно-технической проработки комплекса взаимосвязанных и противоречивых вопросов - концепции, параметры, конструктивные и силовые схемы, конструкции, материалы, технологии изготовления и сборки, методы испытаний, доводки, сертификации, эксплуатации, модернизации и т.д. изделия и его СЭ. Обязательным условием при этом выступает использование накопленного опыта. Накопление опыта проектирования и доводки изделий, создание научно-технического задела, разработка новых стендов и оборудования в организации способствуют постоянному повышению компетентности всех работающих в организации и постоянному совершенствованию изделий, появлению новых модификаций, а также изделий нового типа и схем, что характерно для процесса гармоничного развития.

Но «пороки», заложенные в проект на этапе эскизного проектирования, как правило, приводят к проигрышу по габаритам, массе, технологичности конструкции, трудоёмкости изготовления, срокам доводки и создания, эксплуатационной технологичности, материальным затратам и даже могут поставить под вопрос судьбу изделия. Эти «пороки» в дальнейшем могут быть неустранимыми, несмотря на понятную настойчивость и жёсткую требовательность руководителей, а также старания творческих коллективов.

2.3 Система геометрической структуры

Внешняя структура изделия может быть выражена с помощью системы геометрической связи (ГС). Для этого достаточно трёх свойств (признаков) – формы, комплекса размеров и компоновки при геометрических связях. Под компоновкой понимается объединение (размещение) различных типов СЭ с учётом их свойств для выполнения ФН.

ГС формируется всеми подсистемами, определяющими комплекс свойств-связей конструкции. Среди подсистем ТНА выделим гидро(газо)динамическую, кинематическую, силовую, материалов, прочностную, технологическую, сборки структур, эксплуатационной технологичности, надёжности, экономическую, экологическую и т.д. Так как каждая подсистема имеет своё назначение, т.е. свою цель, и предназначена для решения определённой задачи, то благодаря этому осуществляется декомпозиция цели конструктивной системы. Декомпозицию можно продолжить в рамках каждой подсистемы.

Множество подсистем и свойств-связей конструкции обуславливает множество видов КСх. Согласно [8] множество КСх авиационных ГТД составляет $5 \cdot 10^4$ компоновок, что вместе с большим количеством противоречивых требований, предъявляемых к ДЛА, и наличием трудно формализуемых знаний позволяет отнести задачу выбора конструктивной схемы к классу NP-сложных задач. Согласно [9, 10] хорошие результаты в решении подобных задач даёт применение алгоритмов случайного поиска, в частности, генетического алгоритма.

Любое изделие воспринимается, прежде всего, благодаря свойству внешней структуры, которая отражается в форме ГС (см. рисунок 1). Именно поэтому ГС является основой при разработке КСх. Благодаря свойству гомоморфизма (отношения подобия) КСх представляет собой графическую модель конструкции (изделия). Поэтому она может формироваться в ви-

де условно стилизованных СЭ конструкции, обладающих свойствами, которые необходимы для выражения данной концепции конструкции.

КСх имеют уровневый характер, поэтому для них целесообразно вводить обозначения (см. последний столбец на рисунке 2).

2.4 Необходимость решения оптимизационных проектных задач

Свойства системы ГС также находятся во взаимосвязи и влияют друг на друга. Например, изменение формы проточной части насоса или турбины ТНА изменяет комплекс размеров, что приводит к изменению их нагруженности и действующих на подшипники нагрузок. При этом может потребоваться даже изменение силовой системы агрегата – совокупности СЭ, которые воспринимают действующие на них нагрузки и передают равнодействующие этих нагрузок на узлы крепления ТНА.

Силовая система ТНА, как отмечено в подразделе 2.3, является одной из подсистем его конструктивной системы. Она формирует в ней нагрузочные свойства-связи. Наиболее важным признаком нагрузочных свойств-связей является векторный характер нагрузок, т.е. важно учитывать не только величину, но и направление их.

Силовая система образует множество потенциально возможных структур потоков нагрузок, т.е. область возможных концепций. Именно в этом заключается автономное значение силовой системы. Но каждая конкретная силовая система существует в рамках внешней структуры конструктивной системы. Эти две особенности составляют суть взаимного влияния конструктивной и силовой систем, что является основой для постановки оптимизационных задач при проектировании авиационных и ракетных двигателей [11, 12], а также других типов изделий.

Изделие оценивается благодаря качеству – совокупности свойств, определяющих пригодность использования его по назначению. Качество изделия характеризуется двумя группами комплексных свойств: его техническим совершенством и надёжностью. Техническое совершенство изделия – это комплекс свойств, определяющих уровень его технических, производственных, эксплуатационных, экономических, экологических, эргономических, эстетических, патентно-правовых и др. параметров и характеристик. Надёжность изделия – это свойство его выполнять требуемые функции в течение необходимого времени в заданных условиях и режимах применения, технического обслуживания и ремонтов, транспортирования и хранения [13]. Отсюда следует, что надёжность как комплексное свойство включает парциальные свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, каждое из которых характеризуется своими параметрами. Параметры технического совершенства рассматриваются в определённый момент времени (обычно заявленные в тактико-технических требованиях (ТТТ) на создание ДЛА или в начале его эксплуатации) и не зависят от наработки изделия. Параметры надёжности зависят от наработки изделия.

КСх изделия, являясь концепцией его конструкции, в значительной степени определяет уровень его технического совершенства и надёжности. Для выбора КСх необходимо знать свойства (признаки) различных схем. Окончательный выбор КСх сводится к принятию для конкретных исходных данных совокупности таких значений свойств (признаков), которые позволяют наиболее полно реализовать требования к изделию.

Проблема оптимизации и построения модели конструктивной системы ТНА является трудно формализуемым процессом, определяемым слабым уровнем исходной информации. Положение осложняется непрерывным усложнением КСх ТНА. Пока отсутствует развитый аппарат для описания КСх ТНА из-за неполноты наших знаний, проявляющихся во фрагментарности эмпирических данных и отсутствии пока не выявленных закономерностей эволюции ТНА не отдельной организации, а как класса изделий. Поэтому необходима разработка

такой технологии моделирования и оптимизации КСх ТНА, которая учитывала бы внутреннюю динамику (эволюцию) структуры КСх и адаптивно синтезировала бы модели в условиях неполноты и частичной достоверности данных. Перспективные возможности в этом направлении открывает использование генетических алгоритмов, воспроизводящих (копирующих) общие принципы изменчивости, определяемые генетикой [10].

3 Принципы проектирования конструктивной схемы ТНА

В порядке обобщения проведённого анализа сформулируем принципы проектирования КСх на примере ТНА ракетного двигателя.

3.1 Чёткое формулирование основной цели проекта

ТТТ, которым должны удовлетворять изделие и его СЭ (в рассматриваемом случае - ДЛА и его ТНА), на этапе эскизного проектирования только определяются и далее могут уточняться, изменяться. Поэтому необходимо иметь чёткое представление о том, должны ли быть проектируемые изделие и СЭ с самыми совершенными параметрами по экономичности, предельно малой массой, незначительными размерами, максимальной технологичностью или самыми надёжными в период действия существующей методологии создания изделий, соответствующей последнему поколению техники.

Круг вопросов, рассматриваемых и решаемых при проектировании ТНА, весьма обширен. Кроме решения основных задач обеспечения надёжной работы и параметров агрегата учитываются требования компоновки двигателя и разработчиков смежных агрегатов двигателя, необходимость правильного подбора покупных и комплектующих изделий, а также обеспечения технологичности и минимальной трудоёмкости изготовления и эксплуатации, особенности предстоящей стендовой отработки и т.п. Работа по всем этим направлениям всегда ведётся интенсивно, но, учитывая их противоречивость, достичь обобщённого максимального результата не удастся. Поэтому должна быть выделена главная цель, на которой будут сосредоточены основные усилия конструкторов, технологов, испытателей, эксплуатационников, и выбрана КСх, содержащая такие типы СЭ, которые позволят реализовать главную цель. В рамках этой цели далее оптимизируются параметры по другим направлениям. Следовательно, при проектировании важно найти компромиссные решения в реализации противоречивых требований. Однако конструктор должен уметь поступиться любым из требований, если оно противоречит основному назначению ТНА и требованиям обеспечения параметров технического совершенства и надёжности.

К моменту окончания эскизной компоновки *преодоление противоречий* выражается в полноте и чёткости технического задания (ТЗ) как результата работы конструкторов по изделию в целом и его СЭ.

3.2 Уверенное обеспечение высоких значений параметров изделия

Без реализации этого принципа изделие не может быть использовано с длительной перспективой. Схемные особенности должны создавать резервы для каждого параметра как в процессе доводки, так и на этапе серийного производства, а также при совершенствовании, форсировании или модификации изделия.

Например, в случае ТНА хорошие возможности по давлению компонента топлива обеспечивает центробежная крыльчатка. Даже незначительное увеличение её наружного диаметра позволяет иметь такой дополнительный напор за ней, который не может обеспечить ни эжектор, ни шнековый преднасос. В случае двухступенчатого насоса это позволяет существ-

венно форсировать вторую ступень по скорости вращения, снизить её габариты и массу, так как на её входе обеспечивается значительный кавитационный запас. Заманчиво в этом случае применение двухкаскадных схем ТНА [7]. Но использование многоступенчатых осевых насосов при значительном изменении давления или скорости вращения приведёт к существенным изменениям конструкции, которые дополнительно будут лихорадить доводку.

Возможность значительного форсирования параметров ДЛА при незначительных изменениях конструкции или характеристик ТНА должна обеспечиваться не за счёт переразмеривания СЭ, а быть органической особенностью конструктивной схемы.

3.3 Обеспечение независимых испытаний и доводки узлов

Реализация этого принципа позволяет вести испытания узлов параллельно. Благодаря этому упрощается доводка, сокращаются сроки и стоимость создания ДЛА. Но при этом требуется большое количество специализированных экспериментальных стендов, продуманная идеология их создания, использования и организации работы, включая разработку перспективного научно-технического задела. Очень важно также обеспечить неизменность характеристик узлов после сборки ТНА.

3.4 Использование в конструктивной схеме всесторонне исследованных СЭ, современными знаниями о которых компетентно владеют сотрудники

Лишь при соблюдении этого принципа возможны качественное проектирование, бездефектное изготовление, быстрая доводка и форсирование ДЛА. Использование в новых разработках старых проверенных решений и элементов конструкции способствует созданию новых ДЛА в короткие сроки. По существу этот принцип является принципом преемственности, когда применяются проверенные практикой, хорошо зарекомендовавшие себя проектные, расчётные, конструкторские, технологические, эксплуатационные и другие решения при создании новых изделий. Это особенно важно на этапе формирования КСх будущего ТНА, концентрирующей в себе новое решение и дающей возможность увидеть весь возможный спектр его решений.

Здесь сделаю отступление и опишу своё первое «боевое крещение», связанное с четвёртым принципом выбора конструктивной схемы ТНА.

Весной 1963 г. на меня, тогда аспиранта первого года обучения МАИ, исследовавшего гидростатические подшипники (ГСП) – подшипники скольжения, несущая способность которых, как и в кораблях на воздушной подушке, создаётся подводом под давлением рабочей среды (воздуха или любого другого газа, любой жидкости – воды, компонентов топлива, жидких металлов и т.д.), «вышли» сотрудники отдела ТНА ОКБ, возглавляемого А.М. Исаевым - главным конструктором десятков ЖРД и двигательных установок (ДУ) с использованием различных компонентов топлива, разнообразными системами его подачи для применения на самолётах, зенитных, баллистических, крылатых и тактических ракетах, ракетах морского базирования с подводным стартом, головных частях ракет для разведения боевых блоков, пилотируемых и непилотируемых космических аппаратах в качестве корректирующих и тормозных ДУ, околоземных и межпланетных станциях, посадочных и взлётных ступенях лунных объектов.

Из перечисления изделий и объектов понятно, что благодаря сотрудникам и этого ОКБ (теперь оно называется КБ Химмаш имени А.М. Исаева) был создан ракетный щит нашей страны и обеспечен исторический приоритет советской пилотируемой и непилотируемой космонавтики.

Компоненты топлив двигателей, создаваемых в ОКБ А.М. Исаева, были химически активными (азотная кислота, гиптил и им подобные). Стендовые насосные агрегаты испытательной станции приходилось перебирать практически после каждого запуска ЖРД, так как ресурса уплотнений, расположенных между смазываемыми маслом подшипниками качения и крыльчаткой насоса, хватало на один - два запуска. Это затягивало испытания и сроки создания ДЛА. Поэтому в ОКБ были созданы стендовые насосы с ГСП, рабочей средой (смазкой) которых были компоненты топлива. Предполагалось, что ресурс таких насосов будет огромным. Но при испытаниях насосов начались разрушения ГСП и, как следствие, самих насосов. Специалистов по ГСП в ОКБ не было. Так мне пришлось участвовать в доводке стендовых насосов, проводя необходимые расчёты

статических и динамических характеристик агрегатов, благодаря которым удалось модернизировать ГСП и обеспечить работоспособность насосов. Надеюсь, что моё волнение в начале первой встречи с А.М. Исаевым понятно - такая разница в положении, эрудиции, возрасте (почти 30 лет)! Но благодаря спокойному и доброжелательному тону задаваемых вопросов быстро успокоился. «Так Вы считаете, что причиной разрушения могли быть самовозбуждающиеся колебания ротора?». Был поражён конкретностью и темпом принятых решений по препарированию насосного агрегата, позволившим вместе с моими расчётами сравнительно быстро модернизировать ГСП и завершить доводку стендового насоса. При дальнейших встречах с Алексеем Михайловичем он, здороваясь, задавал в шуточной форме вопрос: «Как там наука о самовозбуждающихся колебаниях роторов?» Не буду скрывать, до сегодняшнего дня горд, что знал этого удивительного человека.

После завершения испытаний стендовый насос с ГСП работал годами без переборок и замечаний. У меня появились основания предложить проектировать не только стендовые насосы, но и ТНА с ротором на ГСП. Он задаёт вопрос: «А кто будет рассчитывать, проектировать, сопровождать изготовление, доводить подшипники? У нас об этих подшипниках, как Вы знаете, самые поверхностные знания. Вы не согласились работать у нас. Сейчас Вы в Куйбышеве, у Вас там своих забот хватает. Эпизодически Вы готовы помогать, но не сможете уделять нам ежедневное внимание. А у нас нет специалистов по этой теме. Да и в отрасли опыта нет. Поэтому применение этой идеи в объектовом ТНА без солидного задела приведёт к неудаче».

Такой вот урок провёл со мною А.М. Исаев.

Конечно, использование только хорошо отработанных конструкций и решений в новых разработках позволяет быстро создавать необходимые изделия. Но по самой сути – это идеология отставания. Такая реализация четвёртого принципа применима во время создания изделий определённого поколения, т.е. действия определённой методологии их создания. Но всё более жёсткие ТТТ к вновь создаваемым изделиям, новые условия эксплуатации, наличие дефектов в базовой (по отношению к проектируемой) конструкции, а также необходимость улучшения показателей технического совершенства и надёжности ДЛА и ЛА требуют разработки и введения новых конструктивных СЭ и прогрессивных решений в конструктивную схему ТНА. Таким образом, возникает противоречие между возможностями известных научно-технических решений и новыми потребностями аэрокосмической техники. Это противоречие диалектическое. Следовательно, необходимо найти направления его устранения, в рассматриваемом случае – совершенствования конструктивной схемы ТНА.

Итак, выявленное диалектическое противоречие может быть устранено созданием научного задела, правильной организацией перспективных научно-технических разработок и опережающей конструктивной, технологической и эксплуатационной отработкой прогрессивных элементов и решений до рабочего проектирования при одновременном условии - освоении сотрудниками созданного задела. Последнее условие является реализацией принципа «образование через всю жизнь».

Рассмотрим примеры, иллюстрирующие отмеченные пути преодоления противоречий между техническими возможностями и потребностями аэрокосмической техники, связанные с деятельностью автора статьи и его коллег.

С 1965 г. нами развивается новое научное направление - использование принципа ГСП для создания устройств нового – гидро(газо)статического типа для решения актуальных проблем, возникающих при создании новой техники [14]. Имеются примеры использования ГСП в водородном ТНА [15, 16]. Но к некоторым разработкам отношение было, мягко говоря, как к экзотике. «Великолепно ведут себя демпферы сухого трения [17]. Зачем и кому нужны гидродинамические?» - спрашивали до 1975–78 г.г., пока ресурс ГТД не превышал 5 тыс.ч. А когда потребовался ресурс за 10 тыс.ч, когда демпферы сухого трения не обеспечивают постоянство своих характеристик из-за изнашивания (хотя разработки в этом направлении на нашей кафедре ведутся активно), тут оказались кстати разработанная теория гидродинамических демпферов, учитывающая многие эксплуатационные факторы, и ряд защищённых патентами конструкций [18]. Благодаря этому внедрение гидродинамических демпферов в ГТД марки НК, спроектированных и доведённых в ОКБ, возглавляемом академиком Н.Д. Кузнецовым, прошло спокойно.

О газо- и гидростатических уплотнениях роторов практически никто не хотел слушать – «К ним нужно подводить поток рабочей среды с отводом его наружу?!» А энтузиасты работали над теорией и поиском патентоспособных конструкций [14, 19], разработкой инновационных технологий, позволяющих обеспечивать работоспособность такого типа уплотнений при зазоре 1–3 мкм и частоте вращения ротора порядка 10 тыс. об/мин. Сегодня трудно себе представить газоперекачивающий агрегат и авиационный привод к нему без

газовых («сухих») уплотнений [20]. Следует упомянуть о гидростатических тягоизмерительных устройствах повышенной точности [14], а также наземных вибрационных и ударных испытаниях тяжёлых космических аппаратов, когда толкающее усилие серийных вибростендов недостаточно и приходится использовать гидростатические вибраторы, разгрузочные и другие устройства [14, 21].

Об этом приятно вспомнить в связи со 100-летием ОАО «Кузнецов» и 70-летием СГАУ и кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов (КиПДЛА), тесные и плодотворные связи между которыми были с самого начала существования КуАИ - СГАУ.

3.5 Устранение неясностей и создание резервов по «критическим» элементам для достижения главной цели проекта путем выбора оптимальной КСх

Эскизная компоновка – это результат поиска конструкции, наиболее полно удовлетворяющей противоречивым требованиям, предъявляемым к ТНА по габаритам, массе, экономичности, прочности, жёсткости, технологичности, экологичности, надёжности и т.д. Как уже отмечалось, цель эскизной компоновки – добиться полноты и чёткости ТЗ прояснением сомнительных вопросов в проекте.

Например, пусть упор делается на обеспечение высокого уровня показателей надёжности проектируемого ТНА. Влияние разных СЭ на надёжность различное. Но из сотен деталей ТНА отказывают один-три десятка одних и тех же элементов. Следовательно, на современном уровне проектирования существуют «критические» СЭ, определяющие надёжность ТНА. На этапе эскизного проектирования составляется их список, «критические» СЭ ранжируются по степени важности. По каждому СЭ анализируются причины отказов двигателей-прототипов или возможных отказов при отсутствии прототипов, намечаются пути их устранения.

Например, список «критических» СЭ может быть таким:

- 1) радиально-упорный подшипник (РУП);
- 2) уплотнения по валам;
- 3) уплотнения по буртам крыльчаток;
- 4) стабильность гидро- и газодинамических характеристик насосов и турбин;
- 5) уплотнения разъёмных соединений корпусов;
- 6) вредное взаимное влияние узлов с различной температурой и разными рабочими жидкостями и т.д.

Этот список условный, но он отражает тот факт, что проблема уплотнений для ДЛА имеет особое значение. Авиационный ГТД имеет до 50 различных уплотнительных устройств. Они определяют экономичность и надёжность двигателя. Отказы уплотнений стоят третьими среди 28 причин аварий ГТД в США [7, 14]. В статье нет возможности представить подробный анализ отказов всех «критических» СЭ из приведённого списка. В качестве примера кратко рассмотрим лишь первый «критический» СЭ – РУП.

Подшипник качения является сложным СЭ, по уровню декомпозиции выше 1-го согласно рисунку 2. Каждая деталь РУП может быть источником отказа. Поэтому структурная схема надёжности РУП представляется в виде последовательного соединения элементов надёжности (его деталей), для которого вероятности отказов элементов умножаются при вычислении вероятности отказа подшипника. Следовательно, с точки зрения надёжности желательно уменьшать количество опор ротора.

Но при этом растёт нагруженность подшипника. Работоспособность подшипников определяется их радиальной и осевой нагруженностью. Несбалансированные радиальные силы как результат неточного проектирования и изготовления обычно фиксируются специальными испытаниями и устраняются. Сложнее обстоит дело с разгрузкой осевых сил, имеющих большой разброс из-за отклонений геометрии деталей, изготовленных даже в пределах допусков [14]. Поэтому на этапе проектирования необходимо предусматривать мероприятия по

снижению осевой нагруженности РУП [7]. Часть этих мероприятий используется в проекте, а некоторые из них рассматриваются как резервные, если потребуется доводка системы разгрузки подшипника от действия повышенной результирующей осевых сил. В последнем случае в проекте предусматривается возможность внесения изменений в конструкцию. Доводка сопровождается, к сожалению, всегда изменением конструкции и технологии производства, испытаний, эксплуатации. Масштаб изменений определяется компетенцией исполнителей и качеством резервных мероприятий.

Как следует из объёма решаемых при проектировании конструктивных схем задач с использованием сформулированных принципов, далеко не последние роли играют *компетентность* и надёжность человека, выполняющего проект.

Заключение

Наши научно-технические творческие связи с разработчиками ТНА различного назначения (РКК «Энергия», КБ «Энергомаш», КБХА, КБ Химмаш, СНТК, ФГУП «Турбонасос») способствовали формулированию и апробации представленных в статье принципов проектирования КСх ТНА. Реализация сформулированных принципов позволяет качественно и ускоренно выполнять эскизную компоновку. Эскизная компоновка становится скелетом будущего изделия, обрастающим проработками конструкторов и производственников.

Настоящая статья задумана как обзорная в ознаменование *70-летия КуАИ–СГАУ* и кафедры КиПДЛА, начавшей свою учебную деятельность в первый учебный день Куйбышевского авиационного института - 1 октября сурового 1942 года.

Хочется хорошими и добрыми словами упомянуть о каждом преподавателе кафедры, взявшем на себя нелёгкий труд подготовки кадров для отечественной ответственной и сложной отрасли техники - авиационной, а теперь – аэрокосмической.

Но вернёмся к теме статьи – только одному из направлений научно-методических поисков, осуществляемых на кафедре КиПДЛА.

В 1970-х г.г. доцент кафедры В.П. Филёкин проводил исследования конструктивных и силовых схем (КССх) отечественных и зарубежных ГТД. В результате были предложены классификационные признаки, на основе которых разработана классификация КССх ГТД различных типов и впервые выполнено аналитическое описание этих схем [8]. По сути, был осуществлён *онтологический подход*, позволивший создать на кафедре уникальную, хорошо структурированную информационную базу по КССх для решения учебных и научных задач анализа и синтеза современных и перспективных ГТД и энергоустановок [22-25]. В этих работах помимо системного представления КССх большинства серийных, опытных и проектируемых отечественных ГТД и устройств были разработаны рекомендации по формализации КССх и синтезу их с использованием современных компьютерных технологий.

В подразделе 2.3 уже отмечалось, что задачу выбора КСх на этапе эскизного проектирования следует отнести к классу NP-сложных задач, и что хорошие результаты в решении подобных задач даёт применение генетического алгоритма. Это направление синтеза КСх на этапе эскизного проектирования активно развивается в УГАТУ Кривошеевым И.А. и Сапожниковым А.Н. [26, 27].

Применительно к ТНА идеи В.П. Филёкина развиваются в СГАУ в направлении алгоритмизации синтеза КСх в системе автоматизированного проектирования ТНА и разработки генетического алгоритма его реализации [1, 7].

Интересные разработки по автоматизированному выбору КСх ТНА на основе метода таблиц применимости выполнены в МАИ Баулиным В.И. [28, 29] и в СибГАУ Краевым М.В. по методу экспертных оценок [30]. Обмен между родственными кафедрами аэро-

космических вузов научно-методическими разработками и выпуск совместных пособий (например, [26]) по вопросам анализа и проектирования КСх способствует более широкому использованию достижений различных коллективов для подготовки инженерных и научных кадров.

Основные концептуальные вопросы проектирования, изложенные в настоящей статье, могут быть использованы при разработке изделий новой техники практически любого назначения с учётом их особенностей. Об этом свидетельствует наш опыт *анализа* и создания *изделий* и устройств принципиально новых типов, назначение которых ясно из названий монографий [16 - 22].

Список источников

- [1] Белоусов, А.И., Косицын И.П., Рождественский С.Н. Гидрогазодинамическое проектирование турбонасосных агрегатов двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – 136 с.
- [2] Вклад ЦИАМ в создание ракетных двигателей / Авторы-составители Гуров В.И., Гулиенко А.И., Семёнов В.Л., Шерстянников В.А., Яновский Л.С. – М.: Изд. ООО «Редакция журнала «Двигатели»», 2010. – 194 с.
- [3] Иванов А.В., Коробченко В.А., Шостак А.В. Конструкция и проектирование уплотнений проточной части насосов и турбин ТНА ЖРД: Учебное пособие. – Воронеж: ВГТУ, 2005. – 86 с.
- [4] Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Компьютерная поддержка изобретательства (методы, системы, примеры, применения). – М.: Машиностроение, 1998. – 476 с.
- [5] Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. М.: Сов. Радио, 1979. – 184 с.
- [6] Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход: Пер. с польск. – М.: Мир, 1981. – 456 с.
- [7] Белоусов, А.И. Конструктивные и силовые схемы турбомашин двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие. – Куйбышев: КуАИ, 1983. – 83 с.
- [8] Филёкин В.П. Атлас конструктивных и силовых схем авиационных ГТД. – Куйбышев: КуАИ, 1984. – 104 с.
- [9] Минаков И.А. Сравнительный анализ некоторых методов случайного поиска и оптимизации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 1999, №2. – С. 286 - 293.
- [10] Кораблин М.А., Минаков И.А. Эволюционные алгоритмы в имитационном моделировании // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды международной конференции. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 1999. – С. 45 – 50.
- [11] Белоусов А.И., Иванов А.И. Расчёт осевых сил, действующих в турбомашине: Учебное пособие. – Куйбышев: КуАИ, 1981. – 82 с.
- [12] Белоусов А.И., Иванов А.И. Методы оптимизации в проектировании двигателей летательных аппаратов: Методические указания. – Куйбышев: КуАИ, 1980. – 30 с.
- [13] ГОСТ 27002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990.
- [14] Белоусов А.И. Один из эффективных путей решения актуальных проблем двигателестроения // Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов: Межвуз. сб. науч. тр. – Куйбышев: КуАИ, 1981. – Вып. 8. – С. 166 – 176.
- [15] Minick A., Peery S. Design and Development of an Advanced Liquid Hydrogen Turbopump // 34th AIAA / ASME / SAE / ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Juli 13-15, 1998 / Cleveland, OH. – 10 p.p.
- [16] Иванов А.В., Белоусов А.И., Дмитренко А.И. Турбонасосные агрегаты кислородно-водородных ЖРД: Монография – Воронеж: Изд-во ГОУ ВПО ВГТУ, 2011. – 284 с.
- [17] Антипов В.А., Ю.К. Пономарёв, Белоусов А.И. и др. Расчёт и конструирование средств виброзащиты сухого трения: Монография / Под ред. проф. Ю.К. Пономарёва. – Самара: Изд-во СамГАПС, 2005. – 208 с.
- [18] Белоусов А.И., Балякин В.Б., Новиков Д.К. Теория и проектирование гидродинамических демпферов опор роторов: Монография / Под ред. проф. А.И. Белоусова. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2002. – 335 с.
- [19] Фалалеев С.В., Чегодаев Д.Е. Торцовые бесконтактные уплотнения двигателей летательных аппаратов: Основы теории и проектирования: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1008. – 276 с.
- [20] Медведев С.Д., Фалалеев С.В., Новиков Д.К., Балякин В.Б. Повышение эксплуатационной надёжности ГПА развитием конвертируемых авиационных технологий: Монография. – Самара: СНЦ РАН, 2008. – 371 с.
- [21] Белоусов А.И., Ткаченко С.И., Самсонов В.Н., Ткаченко О.А. Прочностная и вибрационная отработка космических аппаратов: Монография / Под ред. проф. А.И. Белоусова. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2002. – 502 с.
- [22] Зрелов В.А. Отечественные ГТД. Основные параметры и конструктивные схемы. – М.: Машиностроение, 2005. – 336 с.

- [23] Зрелов В.А., Белоусов А.И. Ретроспективный анализ конструктивных схем отечественных ГТД // Известия вузов. Авиационная техника, № 1, 2006. – С. 36 – 40.
- [24] Зрелов В.А., Проданов М.Е., Белоусов А.И. Анализ динамики создания отечественных авиационных ГТД // Известия вузов. Авиационная техника, № 4, 2008. – С. 7 – 12.
- [25] Белоусов А.И., Зрелов В.А., Миронов А.С. Конструктивно-силовые схемы турбовальных ГТД // Ракетно-космическая техника и технология: Тр. Российской науч.-техн.конф. - Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2009. – С. 12 - 18.
- [26] Зрелов В.А., Проданов М.Е., Кривошеев И.А., Карпов А.В., Сапожников А.Ю. Изучение конструктивно-силовых схем авиационных ГТД: Метод. указания. – Уфа: УГАТУ, 2004. – 28 с.
- [27] Сапожников А.Ю. Применение генетических алгоритмов для выбора конструктивно-силовой схемы авиационного ГТД //Тезисы докладов 3-й научно-технической конференции молодых специалистов и инженеров, 11-14 июля 2007 г. – Уфа: ОАО «УМПО», 2007. – С. 120.
- [28] Баулин В.И. О табличной форме описания алгоритма выбора конструктивных схем двигателя и его составных частей при автоматизированном проектировании // Сб.: Автоматизированное проектирование двигателей летательных аппаратов. – М.: МАИ, 1979. – Вып. 464. – С. 85 – 88.
- [29] Баулин В.И., Зверев К.С. О формализации автоматизированного выбора конструктивной схемы ТНА // Сб.: Автоматизированное проектирование двигателей летательных аппаратов. – М.: МАИ, 1979. – Вып. 464. – С. 88 – 93.
- [30] Баулин В.И., Краев М.В. Конструкция и проектирование турбонасосных агрегатов: Учебное пособие. – М.: МАИ; Красноярск: завод-вузз КПИ, 1985. – 188 с.

Сведения об авторе



Белоусов Анатолий Иванович (1935 г. р.) окончил Куйбышевский авиационный институт в 1960 г. Доктор технических наук (1977), профессор (1978), Заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1985), Почётный работник высшего профессионального образования РФ (2002), академик Петровской академии наук и искусств (1994), академии наук авиации и воздухоплавания (2006), Нью-Йоркской академии наук (2007). Профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов СГАУ. Основатель научного направления повышения надёжности изделий методами и средствами виброзащиты и генерации колебаний на основе гидро(газо)статического принципа. Автор 11 монографий, 125 изобретений, более 50 учебных пособий, 350 научно-технических и 50 научно-методических статей. Подготовил 14 докторов и 37 кандидатов наук. Член диссертационных советов по ДЛА, динамике и прочности машин при СГАУ и по теории и методике профессионального образования при ТГУ.

Anatoly Ivanovich Belousov (b.1935) Graduated from the Kuibyshev Aviation Institute in 1960, Doctor of Technical Sciences (1977), Professor (1978), Honored Scientist of the RF (1985), Honored Worker of Higher Professional Education of Russia (2002), Academician Petrovsky Academy of Arts and Sciences (1994), Academy of Sciences of Aviation and Aeronautics (2006), the New York Academy of Sciences (2007). Professor of Samara State Aerospace University S.P. Korolyov (Department of construction and design of engine of aircraft SSAU

Author of 11 monographs, 125 inventions, of more than 50 textbooks and 350 scientific, technical, and 50 scientific and methodological articles. Belousov prepared 14 doctors and 37 candidates of technical sciences. Member of dissertation councils for aircraft engines, dynamics and strength of machines at Samara State Aerospace University, and on the theory and methodology of professional education at TSU.