

РОЛЬ НАУКИ В РЕШЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Владимир Иванович Бабкин, Генеральный директор ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова", к.т.н.

Требования к современному авиационному двигателю возрастают по мере усложнения конструкции и каждое следующее поколение включает всё большую научную проработку новой конструкции. Возрастает роль ЦИАМ, как института, занимающегося научным заделом новых разработок.

Requirements to the modern aviation engine increase in process of complicating of a construction and each following generation powers up the increasing scientific study of a new construction. Role CIAM, as the institute occupied in a scientific reserve of new workings out increases.

Ключевые слова: авиационный двигатель, научно-технический задел, критические технологии, поколение, уровень готовности технологий, опережающие научно-технические решения.

Keywords: the aviation engine, a scientific and technical reserve, critical techniques, generation, level of readiness the techniques, anticipating scientific and technical decisions.

Современный авиационный двигатель превратился в уникальное изделие машиностроения, аналогов которому по уровню напряжений и тепловому состоянию практически нет. Для того чтобы добиться этого потребовалось создание системы и широкое развертывание научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на поиск новых технических решений и технологий, обеспечивающих быстрое реагирование на конъюнктуру рынка.

Двигатель создается в 1,5...2 раза дольше планера и авиационного оборудования. И для того, чтобы новый двигатель "попал" на новый самолет, требуется опережающая отработка прорывных технических решений и технологий. Такой подход соответствует современной методологии создания и модернизации авиадвигателей, направленной на существенное повышение роли научно-технического задела по критическим технологиям, узлам и системам перспективных двигателей и увеличение объемов их

опережающей экспериментальной отработки на стадии НИР.

Разработка новых конкурентоспособных двигателей - затратный процесс. В связи с ужесточением предъявляемых требований, приводящих к усложнению авиационной техники, стоимость и продолжительность разработки авиационных двигателей от поколения к поколению непрерывно возрастали и для двигателей 5-го поколения доля средств, затрачиваемых на создание опережающего научно-технического задела, составляет ~ 60 % от стоимости разработки, а продолжительность - около 16 лет. Для двигателей 6-го поколения прогнозируется дальнейшее увеличение доли средств, затрачиваемых на создание НТЗ (до ~75 %) и увеличение продолжительности разработки примерно до 20 лет (рис. 1).

Для иллюстрации отметим, что, например, компания General Electric ежегодно затрачивает 1,2 млрд долларов на создание НТЗ. Для обеспечения внедрения разработанных технологий в этом году она открыла 3 завода по производству деталей из ком-



Рис. 1. Доля НТЗ в двигателях последних поколений

Таблица 1. Параметры газотурбинных авиадвигателей различных поколений

Поколения	(1965 1975 гг)	V (1985 1995 гг)	V (2000 2015 гг)	V (2025 2030 гг)
Схема	ТРДД ТРДФ	ТРДД ТРДДФ	ТРДД ТРДДФ	ТВВД ТРДД ДИП
$T_r \cdot K$	1450	1650	1850 1950	2100 2300
$m / \pi \cdot \text{ю.}$	0 2 / 15–20	4–6 / 25–35	8 12 / 35–45	>10 / >60
C_R кг/кг ч	0 70 0 80	0 63–0 65	0 53–0 54	0 44–0 47
Шум / NO_x	Гл 2 /	Гл 3 / ИКАО1986	10 EPN дБ (Гл 4) / 40% (2008)	30–40 EPN дБ (Гл 4) / 60 80% (2008)
Ресурс ть с п ц х ч / г ч	5	25/15	40/20	50/25

НИЭР материалъ технологии узлъ газогенераторъ демонстрационнь е двигатели
ОКР прочностная доводка двигателя и узлов Государственнь е Испъ тания сертификация

позиционных материалов на различных матрицах и планирует инвестировать в ближайшие 5 лет 3,5 млрд долларов на ввод в действие производств деталей из керамических композитов и деталей, производимых с помощью аддитивных технологий.

Общепринятая современная методология создания авиационных двигателей предусматривает проведение научно-исследовательских и экспериментальных работ, начиная от формирования идей по прорывным технологиям (уровень готовности технологии "TRL" = 1) до их проверки на демонстрационном газогенераторе и/или двигателе-прототипе на стендах в условиях близких к реальным условиям эксплуатации (уровень готовности технологии TRL = 6). Только получив экспериментальное подтверждение целесообразности применения технологий в составе демонстрационного газогенератора и/или двигателя (TRL > 6) она может быть рекомендована для применения в двигателе конкретного назначения (рис. 2).

В зависимости от сложности прорывных технологий продолжительность их разработки может составлять около 10 - 15 лет.

К сожалению, в России по ряду причин такая современная методология пока не имеет нормативно-правового статуса и одна из задач Института состоит в ее утверждении в качестве нормативной базы.

Главной задачей ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова" является разработка новых технологий в результате выполнения НИОКР, обеспечивающих будущую конкурентоспособность авиационной техники.

Сегодня отечественное авиадвигателестроение приступило к

созданию двигателей 5-го поколения. В связи с этим тематические работы института ориентированы, прежде всего, на создание научно-технического задела в области разработки конкретных технических решений (технологий) для перспективных базовых двигателей гражданского и военного назначения (гражданской и военной авиации).

За последние годы Институт вышел на мировой уровень по моделированию рабочего процесса и узлов авиационных двигателей. По разработанным в Институте междисциплинарным математическим моделям высокого уровня, учитывающим нестационарное взаимодействие венцов, позволяющим проектировать узлы перспективных двигателей с определением генерации шума в его источнике и дальнем поле, срывные явления, особенности турбулентных течений, детальную химическую кинетику, механику развития трещин, поведение конструкций при сложных условиях нагружения - разработаны узлы двигателей 5-го поколения. Проведены испытания деталей, ступеней и моделей узлов с верификацией расчетных методов. Эти работы позволили приступить ОКБ совместно с Институтом к изготовлению натурных демонстрационных узлов и газогенератора.

К перспективным базовым двигателям гражданской назначения предъявляются жесткие требования по улучшению топливной экономичности, уменьшению уровня шума и выбросам вредных веществ. Удовлетворение этим требованиям может быть обеспечено только при повышении параметров рабочего процесса (суммарной степени повышения давления, температуры газа перед



Рис. 2. Уровни готовности технологий

<p>❑ Малошумный вентилятор</p>		<p>$U_k=367$ м/сек; $\pi_B^*=1,4$; $\eta_{ад}^*=0,91$; Шум - -6 дБ $G_B/F_{лоб}=200$ кг/с·м²</p>
<p>❑ Лопатка РК из полимерного композиционного материала</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Снижение массы на 50% ▪ Испытана на разгонном стенде
<p>❑ Высокоэффективный 7-ступенчатый КВД</p>		<p>Высоконагруженный КВД с НУ и системой рег. РЗ $\pi_k^*=14$, $\eta_k^*=0,88$, $\Delta K_y=20\%$</p>
<p>❑ Малоэмиссионная камера сгорания</p>		<p>$T_r > 1950$ К, $\sigma_{кс} \geq 0,95$, запас по $NO_x \geq 30\%$ (ИКАО 2008)</p>
<p>❑ Одноступенчатая ТВД</p>		<p>Высоконагруженная ТВД: $\pi_T^*=4.65$, $\eta_{ад}^*=0,88$, $U/C_{ад}=0,5$, $\rho=0,52$</p>
<p>❑ Лопатка РК высокотемпературной ТВД</p>		<p>Конвективно-пленочное охлаждение $\theta_{охл}=0,5 \div 0,55$, $T_r \geq 1850$К</p>
<p>❑ Высокоэффективное ЗПК</p>		<p>Активно-реактивный глушитель Шум - -2 дБ</p>

Рис. 3. НТЗ ЦИАМ в обеспечении создания базового двигателя (4-5 уровень готовности технологий)

турбины и степени двухконтурности) с одновременным применением технических решений (технологий), к которым относятся:

- малошумный высокоэффективный одноступенчатый вентилятор;
- облегченная лопатка рабочего колеса вентилятора, в частности из полимерного композиционного материала с накладкой из титанового сплава на передней кромке;
- высокоэффективный малоступенчатый высоконагруженный компрессор высокого давления;
- жаровая труба и фронтные устройства для малоэмиссионной кольцевой камеры сгорания;
- высоконагруженная одноступенчатая турбина высокого давления;
- высокотемпературные лопатки соплового аппарата и рабочего колеса с улучшенной системой конвективно-пленочного охлаждения для высокоэффективной турбины высокого давления;
- конструкция звукопоглощающих панелей и активно-реактивных глушителей шума, обеспечивающих уменьшение уровня шума вентилятора на ~2 дБ.

Все эти технические решения были разработаны, спроектированы, изготовлены (в том числе и с привлечением серийных заводов) и испытаны в ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова" (рис. 3).

Особую актуальность при создании двигателей нового поколения приобретает вопрос внедрения новых материалов, и прежде всего - композиционных.

При применении углепластиковых лопаток, особенно в сочетании с углепластиковым корпусом вентилятора, обеспечивается существенное снижение массы и повышение надежности. Углепластиковые лопатки являются практически необрываемыми, поэтому применение таких лопаток является практически единственно возможным решением для двигателей с открытым ротором вентилятора (без корпуса, который защищает летательный аппарат от фрагментов лопаток). По данным General Electric, вентилятор с лопатками и корпусом из углепластика двигателя LEAP легче металлического на 225 кг.

В ЦИАМ достигнуты определенные успехи в разработке тех-

нологии создания углепластиковых лопаток вентилятора. Применение таких лопаток позволит снизить массу ротора вентилятора двигателя ПД-14 более чем на 30 % по сравнению с вентилятором с пустотелыми титановыми лопатками [журнал "Двигатель" № 6 за 2011 г., стр.2-9, примечание редакции].

По двигателям военного назначения ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова" принимает активное участие в работах по ТРДДФ для ПАК ФА и поршневого двигателя для беспилотного летательного аппарата. В частности, по ТРДДФ для ПАК ФА институтом совместно с ОКБ отрасли создан экспериментально обоснованный научно-технический задел по:

- малоступенчатый высоконагруженный вентилятору и КВД с низкой массой;
- основной высокотемпературной камере сгорания;
- высокотемпературной одноступенчатой ТВД;
- легкой форсажной бесстабилизаторной камере сгорания;
- цифровой САУ с полной ответственностью (FADEC).

По поршневому двигателю для БПЛА проведены работы по:

- обоснованию облика и основных данных;
- разработке ТЗ на узлы и системы;
- созданию и испытанию экспериментальных узлов и систем;
- созданию двигателя-демонстратора в классе мощности 90 л.с.;
- разработке ТЗ на ОКР.

В последние годы в ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова" проведен большой объем исследований по двигателям, предназначенным для применения в составе силовых установок высокоскоростных летательных аппаратов.

В частности, проведена реконструкция стенда Ц-16ВК, позволившая проводить испытания крупномасштабных моделей гиперзвуковых летательных лабораторий с интегрированным гиперзвуковым прямоточным воздушно-реактивным двигателем. На одной из моделей ГЛЛ с ГПВРД впервые в Европе получена положительная эффективная тяга.

В области работ по малообъемным прямоточным воздушно-реактивным двигателям и ракетно-прямоточным двигателям проведены работы по:

- созданию высокоэнергетических маршевых твердых топлив для РПД и ПВРД;
- разработке узлов воздушного и газового тракта ИРПДТ (ВЗУ, переходный канал, регулятор расхода твердого топлива, камера сгорания);
- разработке двухконтурной камеры сгорания ПВРДТ с высокой полнотой сгорания для малоразмерной ЗУР;
- созданию работоспособных стендовых РПДТ и ПВРДТ для ракет класса "воздух-воздух", ЗУР и АРС;
- созданию ПВРДТ, обеспечивающих двукратное увеличение высоты и дальности полёта ЗУР;
- разработке методов математического моделирования РПДТ и ПВРДТ с учётом интеграции "ракета-двигатель-топливо".

Учитывая продолжительность разработки технологий и планируемые сроки создания двигателей 5-го поколения необходимо в кратчайшие сроки организовать работу так, чтобы устранить технологическое отставание, которое образовалось в последние два десятилетия, и одновременно развернуть работы по созданию научно-технического задела в обеспечение разработки двигателей уровня совершенства 2025 - 2030 гг.

К двигателям гражданского назначения с уровнем совершенства, соответствующим 2025 - 2030 гг., предъявляются высокие требования, как по топливной эффективности, так и по экологическим показателям. Так, например, среди них:

- уменьшение удельного расхода топлива на 25...30 %;
- обеспечение запаса по уровню эмиссии NO_x в 80 % относительно норм САЕР6 ИКАО;
- уменьшение уровня шума двигателя на 15...20 EPN дБ относительно норм Главы 4 ИКАО;
- уменьшение стоимости послепродажного обслуживания и

производства на 30...40 %.

Достигнуть этих показателей можно только путем повышения параметров рабочего процесса, совершенствованием термодинамического цикла, применения новых конструктивно-технических решений, конструкционных материалов и технологий, а также интеллектуальной системы управления совмещенной с системой диагностики, контроля и управления техническим состоянием двигателя и интеграции силовой установки с планером летательного аппарата.

В качестве схемных решений для достижения поставленных целей учитываются:

- ТРДД с высоким и сверхвысоким значением степени двухконтурности с прямым или редукторным приводом однорядного или двухрядного вентилятора;
- турбовинтовентиляторные двигатели ("открытый" ротор);
- ТРДД с промежуточным охлаждением и регенерацией тепла;
- распределенные силовые установки; двигатели с гибридным приводом движителя (газотурбинный + электрический привод); двигатели с пульсирующей детонационной камерой сгорания и т.д.

Кроме того, рассматриваются "электрический" двигатель с отсутствием отбора воздуха из тракта и электроприводными исполнительными механизмами системы автоматического управления, стартером-генератором на валу каскада высокого давления и генератором на валу каскада низкого давления и "интеллектуальный" двигатель, система диагностики которого обеспечивает управление техническим состоянием и эксплуатацию двигателя с допустимым уровнем повреждений.

Для реализации таких схем двигателей потребуется разработать ряд новых технических решений и технологий, которые будут разрабатываться в рамках Комплексных научно-технических проектов и Программ научных исследований и разработки технологий, включенных в Национальный план развития науки и технологий в авиастроении и Государственную программу развития авиационной промышленности до 2025 г. (рис. 4).



Рис. 3. НТЗ ЦИАМ в обеспечение создания базового двигателя (4-5 уровень готовности технологий)



Рис. 5. ГЛЛ ЦИАМ

В целях сохранения и развития авиадвигательной отрасли промышленности необходимо коренное обновление экспериментальной и технологической базы.

В области создания двигателей для перспективных дозвуковых и сверхзвуковых ЛА требуется модернизация двигательных стендов ЦИАМ Ц-1А (исследование двигателей размерности ПД-14), Ц-4Н (для двигателя ПАК ФА), Ц-17Т (ракетные двигатели); УВ-3К (двигатели с тягой до 5 тс), У-10М (климатические испытания), У-335, У-336 (двигатели БПЛА) и др. В долгосрочной перспективе необходимо создание комбинированного эталонного открытого стенда для проведения испытаний ТРДД сверхвысокой степени двухконтурности и ТВВД ("открытый ротор"), испытаний авиационных двигателей при попадании на вход посторонних частиц с аэродромных покрытий, кусков льда и птиц в условиях взлета и посадки, а также комплекса испытаний по ИК заметности и боевой живучести.

Требуется модернизация ряда установок, позволяющих проводить исследования работы силовых установок в гиперзвуковых областях полета, а в среднесрочной и долгосрочной перспективе - последовательный ввод в эксплуатацию высотного гиперзвукового стенда Ц-110 с диаметром выходного сечения аэродинамического сопла не менее 3 м для испытаний полноразмерных ГПВРД в интеграции с ГЛА. Представляется весьма целесообразным в среднесрочной и долгосрочной перспективах создание гиперзвуковых летающих лабораторий (ГЛЛ) для испытаний демонстраторов высокоскоростных ВРД в условиях активного полета.

Для обеспечения готовности экспериментальной базы к проведению исследований и испытаний двигателей 5-го и 6-го поколений необходима модернизация существующих технологических систем ЦИАМ (высотно-компрессорных и холодоильно-осушительных станций, систем охлаждения, энергоснабжения и др.), направленная на расширение диапазона предельных параметров стендов и внедрение энергосберегающих технологий. Параллельно должны решаться вопросы модернизации самих высотных стендов, создания модельных стендов и установок для отработки критических технологий, верификации расчетных методов и т.д., развития экспериментальной базы прочностных исследований и оснащения стендов высокоточными системами измерения, в том числе бесконтактными.

Требуется решения также вопрос финансирования содержания инфраструктуры крупнейшей в Европе уникальной экспериментальной базы НИЦ ЦИАМ, представляющей собой национальное достояние.

Для обеспечения ускоренного развития инновационной инфраструктуры высокотехнологичной отрасли - авиадвигателестроения - ведущая роль принадлежит государственному сектору науки в лице государственных научных центров (ГНЦ) (ЦИАМ, ЦАГИ, ВИ-АМ). В настоящее время ГНЦ, обладающие высоким научным потенциалом, научными школами и уникальной экспериментальной

базой - единственная существующая система по созданию и переводу научных и инженерных достижений фундаментального и прикладного характера в конкурентоспособную инновационную продукцию при тесной кооперации с предприятиями отрасли.

В частности, существующую высотную базу ЦИАМ необходимо активно использовать при создании двигателей 5-го поколения ПД-14 и изделия 30 (испытания в термоборокамере газогенераторов и двигателей с имитацией полетных условий во всей эксплуатационной области, прочностные испытания дисков лопаточных машин на разгонных стендах и др.), поскольку именно эта стендовая база в полном объеме обеспечивает имитацию работы газогенератора и двигателя на большинстве основных режимов, чего нельзя сказать о стендах ОКБ.

Государственные научные центры ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ, ГосНИИАС и др., определяющие приоритетные направления перспективных научных исследований, разрабатывающие и координирующие комплексные и специализированные программы, а также планы по развитию авиационной техники, выступали и продолжают выступать в настоящее время, в роли организаций, формулирующих государственные интересы в области экономической и военной безопасности. В связи с этим необходимо шире привлекать ГНЦ к разработке и корректировке федеральных и комплексных целевых программ.

Принципиальное значение имеет обязательное участие головного института двигателестроительной подотрасли - ЦИАМ, который в настоящее время является единственной государственной организацией, обладающей необходимым научным потенциалом и уникальной экспериментальной базой - как в непосредственном проведении ОКР при широком использовании экспериментальной базы института, так и в экспертизе работ, проводимых ОКБ по гос. контрактам.

Учитывая сжатые сроки создания двигателей нового поколения, необходимо обязательное согласование с ЦИАМ программ и планов-графиков инженерных и сертификационных испытаний, программ работ по доведению критических для создания двигателя технологий до 6-го уровня готовности. Невыполнение этого приведет к значительным потерям информации, задержкам обоснованной коррекции конструкции двигателя и увеличению сроков и стоимости его разработки.

В ЦИАМ проводятся также работы по сопровождению эксплуатации серийных двигателей. При институте работают Межведомственные рабочие группы по анализу и выработке рекомендаций в обеспечение эффективной эксплуатации двигателей на протяжении заявленного ресурса и срока службы.

Именно такое построение взаимодействия науки и практики обеспечило устойчивость системы авиационной науки в период экономических кризисов. Нацеленность на научное решение практических задач - способ, которым, взаимодополняясь, сосуществуют наука и практика авиационного двигателестроения в России. **□**

Литература

1. Энциклопедия Машиностроение. Том IV-21, книга 3. Авиационные двигатели. М., Маш. А, 2010.
2. Иностранные авиационные двигатели (по материалам зарубежных публикаций). Справочники ЦИАМ.
3. Пассажирская авиация: пути развития в XXI веке. Бабкин В.И., Цховребов М.М., Шкадов Л.М., доклад на II Канадском симпозиуме, Ванкувер, 1991.
4. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей. Под ред. Скибина В.А., Солонина В.И. ЦИАМ, М., 2010 г.
5. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор). Под редакцией Скибина В.А., Солонина В.И. ЦИАМ, Москва, 2004 г.