



СОВРЕМЕННАЯ МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И МЕСТО НАУКИ В ЭТОМ ПРОЦЕССЕ

ФГУП "ГНЦ ЦИАМ им. П.И. Баранова": **Владимир Иванович Бабкин**, к.т.н., первый заместитель генерального директора, **Валентин Иванович Солонин**, к.т.н., советник генерального директора

Современный авиационный двигатель является уникальным изделием машиностроения, аналогов которому по напряжениям и тепловому состоянию практически нет. Для того, чтобы добиться этого, потребовалось развернуть научные исследования, направленные на разработку перспективных технологий, материалов, поиск новых технических решений и опытно-конструкторские работы (НИОКР) по подтверждению эффективности разработанных технологий и разработать нормативно-техническую документацию, регламентирующую процесс создания авиационного двигателя.

Современный газотурбинный двигатель для гражданской авиации обеспечил за 70-летний срок примерно в 2 раза снижение удельного расхода топлива, многократное повышение ресурса, надежности, безопасности, экологических характеристик и способность эффективно функционировать в существенно различных условиях. Двигатель для военной авиации в 2 раза уменьшил массогабаритные характеристики, на 20-30% снизил удельный расход топлива, обеспечил крейсерский бесфорсажный полёт со сверхзвуковой скоростью, великолепные динамические характеристики, устойчивую работу при больших возмущениях на входе в двигатель и пр. Все эти качества авиационного двигателя позволили превратить авиацию в важнейшую мировую транспортную систему и в основную составляющую обороноспособности страны [1]. В связи с этим авиадвигателестроение за рубежом входит в перечень важнейших критических технологий и при обеспечении создания рассматривается как самостоятельный коммерческий продукт. Кроме того, двигатель создается в 1.5...2 раза дольше планера и авиационного оборудования. И для того, чтобы он "попал" на новый летательный аппарат, требуется опережающая отработка критических технологий и материалов. Такой подход соответствует современной методологии создания авиационных двигателей, направленной на существенное повышение роли научно-технического задела по критическим технологиям, узлам, новым конструктивным решениям, системам перспективных двигателей и увеличение объёмов их опережающей экспериментальной отработки на стадии научно-исследовательских и экспериментальных работ (НИЭР). За рубежом разработка новых технологий играет ключевую роль в обеспечении конкурентоспособности выпускаемой авиационной техники.

В целях достижения максимально возможного уровня технического совершенства, снижения сроков и стоимости разработки двигателей в рамках специальных программ постоянно ведется опережающая отработка новых технических решений. Во многом благодаря этим программам, проводимым при активной поддержке со стороны государства, обеспечивается конкурентоспособность зарубежным авиадвигателестроительным компаниям на мировом рынке.

Программы по двигателям военного и гражданского назначения взаимно дополняют друг друга, поскольку на 70-80% используют общие технологии (методы расчёта, конструкторские решения, конструкционные материалы, технологические процессы и т.д.) при создании новых и модернизации находящихся в эксплуатации двигателей [4].

Кроме того, программы развития технологии, обеспечивающие все возрастающие требования к авиационным двигателям, стимулируют развитие конструкционных материалов, технологического оборудования, электронной, электрической техники и др. Это все

обеспечивает новыми технологиями транспорт, энергетику, газоперекачку и другие отрасли промышленности.

США продолжают оставаться мировым лидером в разработке новых технологий для силовых установок летательных аппаратов различного назначения, что позволяет предприятиям авиационной промышленности США занимать ведущие позиции на мировом рынке авиационной техники.

Инициаторами проведения таких исследований в США являются федеральные агентства. В области газотурбинных двигателей, это, прежде всего, Министерство обороны, Министерство транспорта США и NASA, которые строят свою исследовательскую деятельность на основе долгосрочных прогнозов (на 25-50 лет) и стратегических планов работ. Эти планы предусматривают проведение как фундаментальных, так и прикладных исследований, к участию в которых широко привлекаются компании авиационной промышленности и представители академического сектора науки (университеты и государственные научные центры). При этом бюджетное финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по линии Министерства обороны США в несколько раз превышает аналогичную величину других федеральных агентств [2].

Зарубежные авиадвигателестроительные компании уже несколько десятилетий назад перешли на новую методологию создания двигателей, обеспечивающую значительное снижение сроков и стоимости разработки, суть которой состоит в том, что решение о начале опытно-конструкторских работ принимается только тогда, когда компанией накоплен необходимый уровень знаний и проверенных конструкторских решений, обеспечивающих безусловное выполнение поставленной задачи в заданные сроки.

В обеспечении необходимого уровня знаний в процессе проведения программ за рубежом с середины 1990-х годов используются разработанные NASA уровни готовности новых технологий [4].

Эти знания и решения компания получает в результате участия в программах разработки перспективных технологий или, как их еще часто называют, программах обеспечения технологической готовности. В рамках этих программ создаются демонстраторы технологий, на которых отрабатываются детали и узлы перспективных двигателей. До тех пор, пока не будет достигнут уровень готовности технологии, обеспечивающий проведение испытаний демонстрационного газогенератора или двигателя в реальных условиях эксплуатации (уровень технологической готовности TRL=6), ни одна зарубежная компания не будет её использовать при создании двигателя нового поколения.

Но для того, чтобы внедрить проверенные технические решения, необходимо, чтобы на каждом этапе создания продукта (системы) был достигнут необходимый уровень готовности технологических процессов. Сопоставление этапов создания и эксплуатации системы с уровнями готовности технологий и уровнями готовности технологических процессов было разработано Министерством обороны США (МО США) в конце 1990-х - начале 2000-х годов и стало внедряться в аэрокосмической промышленности США (рис. 1) [5], [6].

Таким образом, жизненный цикл двигателя в соответствии с методологией делится на этапы:

- предварительное определение и утверждение концепции (НИЭР);
- разработка технологий, демонстрация технологической готов-



Предварительное определение и утверждение концепции (НИЭР)			Разработка технологий (НИОКР)			Этап разработки и демонстрации системы (ОКР)		Серийное производство и утилизация	
Уровни готовности технологических процессов (MRL)	MRL3	MRL4	MRL6	MRL6	MRL7	MRL8	MRL9	MRL10	
	Концепция и проверка в лабораторных условиях	Серийная технология для деталей	Серийная технология для узла (системы)	Серийная технология на заводе	Готовность к МПР	МПР Готовность к СПР	СПР Передача на другие заводы		
Уровни готовности технологий (TRL)									
TRL.1	TRL.2	TRL.3	TRL.4	TRL.5	TRL.6	TRL.7	TRL.8	TRL.9	
Базовые принципы	Формулирование концепции	Утверждение концепции	Проверка на моделях	Проверка в условиях, близких к натурным	Проверка прототипа в условиях, близких к натурным	Проверка прототипа в реальных условиях	Сертификация системы	Начало эксплуатации	

Рис. 1. Этапы создания и эксплуатации двигателя и необходимые уровни готовности технологий (TRL) и уровней готовности технологических процессов (MRL) (МПР - мелкосерийное производство; СПР - серийное производство)

Предварительное определение и утверждение концепции и облика двигателя (НИЭР) базируется на научно-техническом прогнозе развития авиационных двигателей, который устанавливает уровень совершенства конкурентоспособного двигателя на 15-20 лет. Прогноз базируется на фундаментальных исследованиях и "прорывных" технологиях. В процессе поисковых НИР 1 и 2 уровней готовности рассматриваются перспективные схемы двигателей, новые материалы, технологические процессы и конструкторские решения. На основе прогнозных исследований формируются технические облики вариантов базового двигателя нового поколения и определяется перечень поисковых НИР для расчётно-экспериментального обоснования выбора концепции двигателя.

В рамках проведения поисковых НИР проводятся расчётно-экспериментальное обоснование эффективности ключевых технологий путем исследований элементов конструкции ступеней, моделей узлов, систем, разрабатывается концепция технологий их изготовления, исследуются новые материалы. В результате этих работ обосновывается возможность их реализации в базовом двигателе и разрабатываются технические задания (ТЗ) на экспериментальный газогенератор (ЭГГ), двигатель-демонстратор и

ности к разработке двигателя (НИОКР);

- этап разработки и демонстрации готовности двигателя к серийному производству (ОКР);
- серийное производство и утилизация.

В России разработка методологии поэтапного создания двигателя началась с середины 80-х годов, когда был разработан в ЦИАМ, согласован с заказчиками и утвержден ОСТ "Двигатели газотурбинные летательных аппаратов. Порядок выполнения работ на стадии разработки" [7] и "Руководство для конструкторов: обязательные виды и объёмы испытаний опытных экспериментальных ГТД на стендах ЦИАМ" [8].

Однако в конце 80-х годов в стране начались экономические преобразования, которые привели к кризису в авиационной промышленности. Из-за резкого снижения финансирования практически прекратилось создание новых двигателей, и резко сократилось бюджетное финансирование научно-исследовательских работ по разработке новых технологий. В этих условиях интерес к развитию и совершенствованию современной методологии и использование её при создании двигателей потерял актуальность.

Начиная с 2000 года, в авиадвигателестроении, как и во всей экономике страны, начали проявляться элементы оживления и определенного роста промышленного производства. Однако оно происходит в новых условиях открытого рынка при жесткой конкуренции с ведущими зарубежными авиадвигателестроительными фирмами. Для обеспечения максимально быстрого реагирования на конъюнктуру рынка и получение конкурентоспособных двигателей в минимальные сроки и при минимальных затратах, актуальность внедрения современной методологии создания двигателей сильно возросла. С этой целью разрабатывается целый ряд нормативных документов, развивающих и уточняющих поэтапный порядок создания двигателей [9-15], в котором важнейшую роль играет опережающая экспериментальная отработка ключевых технологий, технологических процессов, узлов, систем, экспериментальных газогенераторов и двигателей-демонстраторов. К сожалению, эти работы не были оформлены в виде обязательных нормативных документов.

Основные положения поэтапной методологии создания перспективного двигателя представлены на рис.2.

предложения по перечню прикладных НИР. Все эти работы проводятся НИИ с участием представителей промышленности. ТЗ на двигатель-демонстратор и перечень прикладных НИР рассматриваются на НТС заказчика с широким привлечением и оппонированием

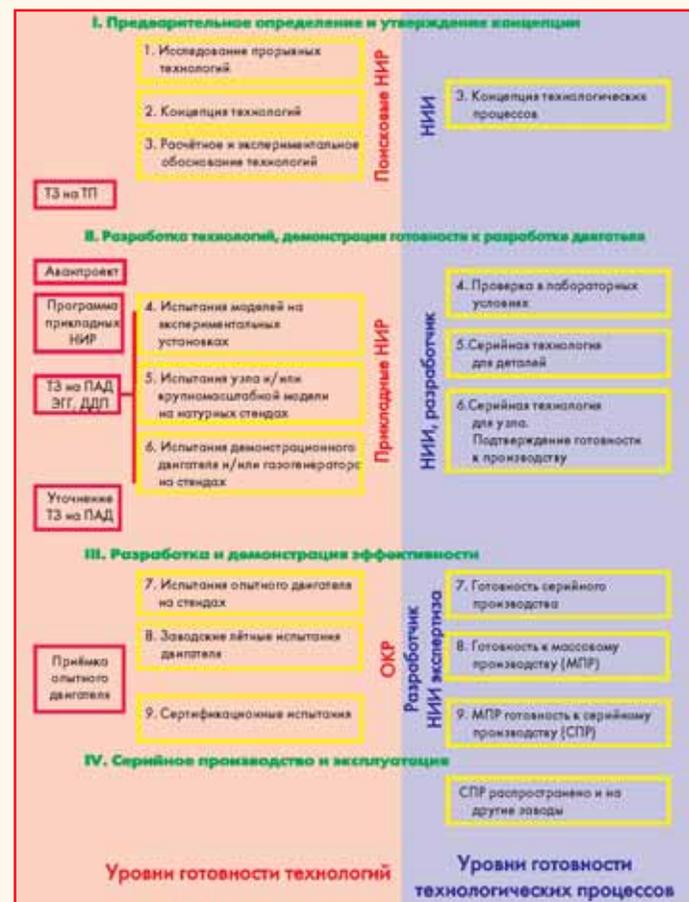


Рис. 2. Этапы создания двигателя

представителей промышленности. После утверждения ТЗ на двигатель и перечня прикладных НИР ОКБ разрабатывает техническое предложение (аванпроект), которое проходит экспертизу ЦИАМ и НИИ промышленности.

Этап разработки технологий базового двигателя проводится ОКБ-разработчиком при тесном взаимодействии с ЦИАМ и НИИ отрасли. В рамках прикладных НИР проводятся работы по исследованию новых технологий и экспериментальные исследования крупномасштабных моделей, полноразмерных узлов. Детали, изготовленные из новых материалов, и производственные процессы должны продемонстрировать приемлемое качество и уровни надежности в условиях, близких к эксплуатационным.

Разрабатывается технико-экономическое обоснование на разработку двигателя совместно с ЦИАМ, НИЦ отрасли и разработчиком летательного аппарата.

На основании разработанного эскизного проекта и выполнения прикладных НИР возможно проведение конкурса по выбору головного разработчика.

После проведения экспертизы выполненных работ ЦИАМ и другими НИИ отрасли совместно с разработчиком летательного аппарата уточняется ТЗ на двигатель.



парата уточняется ТЗ на двигатель.

По решению заказчика принимается решение об утверждении ТЗ и разработке технического проекта, а также создания натуральных узлов, экспериментального газогенератора и двигателя-демонстратора прототипа. Причем узлы, экспериментальный газогенератор и двигатель-демонстратор, изготовленные по технологическим процессам, максимально приближенным к серийным технологиям, должны пройти исследования в условиях максимально приближенных к эксплуатационным, в том числе в ТБК ЦИАМ. Результаты проведенных работ проходят экспертизу ЦИАМ и НИИ отрасли и заказчика.

На основе экспертизы проводится заседание НТС заказчика, на котором принимается проект Постановления Правительства о разработке и демонстрации заданных эксплуатационных характеристик.

Начинается этап разработки и демонстрации готовности двигателя к государственному (сертификационному) испытаниям (ОКР).

Разрабатывается технический проект, РДК и технологическая документация на опытный двигатель. Проводится экспериментальная проверка узлов, газогенератора и опытного двигателя на обеспечение заданных в ТЗ характеристик во всей области эксплуатации, включая испытания в ТБК и на летающей лаборатории. Испытания проводятся в соответствии с требованиями нормативных документов. Причем изготовление двигателя должно производиться на заводе по серийной технологии. После успешного проведения экспериментальных, доводочных работ проводятся Государственные стендовые испытания, в соответствии с нормативными документами [13], которые являются основой сертификации двигателя. Все эти работы проводятся с широким участием ЦИАМ, НИИ отрасли. Причем все программы испытаний согласовываются с ЦИАМ и по результатам их проведения составляются заключения.

Как было отмечено выше, создание уникального высокотехнологичного изделия, которым является авиационный двигатель, невозможно без участия науки и головного института ГНЦ "ЦИАМ им. П.И. Баранова". Уникальные свойства двигателя базируются на фундаментальных и прикладных исследованиях в области газовой динамики, кинетики горения, теплопроводности, динамики и прочности, которые проводятся

совместно с другими ГНЦ и институтами РАН.

Так, проводимые в институте расчетно-экспериментальные исследования трёхмерных нестационарных течений послужили основой разработки моделей турбулентности и критериев адекватности при вычислительном моделировании течений в узлах двигателей с учётом нестационарного взаимодействия венцов турбомашин, срывных явлений и их аэроакустических характеристик. Разработанные многодисциплинарные математические модели высокого уровня, верифицированные путем испытаний деталей, ступеней, моделей узлов, позволили разработать: высокоэффективный малошумный вентилятор с надроторным устройством, фронтальные устройства малоэмиссионных камер сгорания, турбинные лопатки большого ресурса с высокоэффективной системой охлаждения, шевронные сопла, активно-реактивные ЗПК и другие новые технические решения.

Эти работы позволили ОКБ приступить к созданию и изготовлению натуральных узлов, газогенератора и демонстрационных двигателей нового поколения.

В области динамики и прочности особое внимание уделяется исследованиям конструктивной (реализуемой в конструкции в ожидаемых условиях эксплуатации) прочности, разработке моделей деформирования и разрушения новых материалов (монокристаллических лопаток и гранулируемых дисковых никелевых суперсплавов, интерметаллидов, различных типов композиционных материалов и др.). Эти работы получили широкое признание у научной общественности и специалистов промышленности.

Большой объём пионерских работ был выполнен по механике композиционных материалов. Эти работы включали технологические проработки, механические испытания, физические исследования, разработку методов расчёта. Так, в Институте была разработана структурная теория деформирования композиционных материалов, позволяющая описать физические явления, которые не охватываются механикой однородного анизотропного тела.

Существенное развитие получили методы оценки долговечности и подтверждения ресурса критических по последствиям разрушения деталей двигателя, в том числе с учетом возможного наличия в них дефектов. Создана теория устойчивого роста усталостных трещин, объединяющая процессы разрушения на разных масштабных уровнях от появления трещины до её подрастания в каждом цикле нагружения. На этой основе разработан комплекс методов фрактального реконструирования и расчётного прогнозирования кинетики усталостных трещин, который используется для назначения интервалов дефектоскопического контроля и прогнозирования циклической долговечности деталей двигателя.

Внедрены в расчетную практику методы, позволяющие оценивать поведение двигателя в экстремальных условиях, в том числе последствия попадания в тракт двигателя посторонних предметов (птиц, льда и др.), обрыва лопатки и т.д.

Как правило, исследования динамики и прочности, начинавшиеся как функциональные, завершаются разработкой рекомендаций для конструкторов и/или нормативных технических документов.

На базе фундаментальных исследований и поисковых работ ЦИАМ с другими ГНЦ формирует прогноз развития авиационных двигателей на 10...15 лет, проводит исследование по формированию облика двигателей будущего и технологий прорывного характера, которые должны обеспечить кардинально улучшенные летно-технические характеристики и значительное снижение уровня шума эмиссии.

Для достижения поставленных целей прорабатываются двигатели принципиально новых схем. Это ТРДД сверхбольшой степени двухконтурности с редуктором, двигатель с "открытым ротором", с регенерацией тепла, с промежуточным охлаждением, "интеллектуальные" двигатели с применением нано- и MEMS-технологий, "электрические" двигатели со встроенным стартером-генератором, магнитными опорами вращающихся валов и др.

В институте проводятся работы по новым "прорывным" технологиям в обеспечение создания этих двигателей. Современная методология создания двигателя базируется на интеграции систем матема-

тического моделирования высших уровней, компьютерного проектирования и автоматизированного изготовления деталей (с использованием новейших материалов и технологических процессов).

Однако основным требованием методологии является экспериментальная отработка новых технологий технических решений в условиях, максимально приближенным к эксплуатационным. При этом успех в разработке критических технологий и перспективных двигателей во многом определяется реализацией комплекса мероприятий:

- **разработка методологии проведения испытаний** узлов перспективных авиационных двигателей (математическое моделирование и верификация математической модели, выпуск нормативно-технической и методической документации и т.д.);

- **совершенствование и развитие методов и средств измерений** для повышения информативности экспериментальных исследований, сокращения объёма и сроков проведения испытаний, разработка нормативных требований к метрологическому обеспечению испытаний;

- **улучшение технологического обеспечения испытаний** путём развития инфраструктуры экспериментальной базы по располагаемым параметрам, разработки экономичных методов испытаний, создания новых стендов и установок;

- **автоматизация испытаний и информационное обеспечение эксперимента** путём создания информационно-измерительных и управляющих систем и аппаратно-программных средств для повышения информативности испытаний, надёжности и безопасности работы системы их технологического обеспечения.

Институт обладает уникальной экспериментальной базой, поэтому успех реализации современной методологии не может быть реализован без широкого его участия на всех этапах создания двигателя. Роль института охватывает работы от экспериментальной верификации расчётных методов, испытания деталей, узлов, газогенератора до испытаний опытных двигателей с имитацией условий их работы, максимально приближенных к эксплуатационным. Роль и место экспериментальных исследований при создании двигателя подробно описаны в работе [3].

В обеспечении ускоренного инновационного развития высокотехнологичной отрасли - авиадвигателестроения - ведущая роль принадлежит государственному сектору науки в лице государственных научных центров (ЦИАМ, ЦАГИ, ВИАМ). 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.

Кроме того, государственные научные центры ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ, ГосНИИАС и др., определяющие приоритетные направления перспективных научных разработок, разрабатывающие и координирующие комплексные и специализированные программы и планы по развитию авиационной техники, выступали и продолжают выступать в настоящее время в роли организаций, формулирующих государственные интересы в области экономической и военной безопасности. Институты также разрабатывают предложения по уточнению действующих и разработке новых нормативных, методических и нормативно-технических документов, регламентирующих создание и эксплуатацию двигателей.

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 госконтрактам.

В настоящее время авиационная промышленность приступила к созданию ряда летательных аппаратов и двигателей нового поколения к ним. Причем в современных политических условиях сроки



создания их должны быть максимально сокращены, в связи с чем особую актуальность приобретает создание развернутой программы прикладных НИР по отработке новых технологий, узлов, экспериментальных газогенераторов, которые должны проводиться при тесном взаимодействии ОКБ с ЦИАМ и завершаться испытаниями в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, по согласованным с институтом программам.

Таким образом, успех создания конкурентоспособных двигателей нового поколения в значительной мере будет определяться соблюдением современной методологии создания двигателей. **▲**

Литература

1. Бабкин В.И., Цховребов М.М., Солонин В.И., Ланшин А.И. Развитие авиационных ГТД и создание уникальных технологий. Двигатель № 2 (86), 2013 г.
2. Бабкин В.И. Роль и место науки в инновационном развитии авиационного двигателестроения. Двигатель № 3(105) 2016 г.
3. Бабкин В.И. Солонин В.И. Роль и место экспериментальных исследований при создании перспективных авиационных двигателей. Двигатель № 4 (100) 2015 г.
4. Работы ведущих авиадвигательных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор). Под общей редакцией д.т.н. Скибина В.А. и к.т.н. Солониной В.И. / ЦИАМ 2004 г. С. 424.
5. Jim Morgan. Manufacturing Readiness Levels (MRLs). In an S& T Environment. U.S. Air Force, 2008.
6. Jim Morgan. An Orientation to: Manufacturing Readiness Levels and Manufacturing Readiness Assessments. U.S. Air Force, 2007.
7. ОСТ 102501-84. Двигатели газотурбинные летательных аппаратов. Порядок выполнения работ на стадии разработки 1984 г.
8. Руководство для конструкторов. Обязательные виды и объёмы испытаний опытных и экспериментальных авиационных ГТД на стендах ЦИАМ, 1987 г.
9. РТМ 300-01. Типовая номенклатура специальных стендовых испытаний экспериментальных газогенераторов и демонстрационных авиационных двигателей-прототипов 2007 г.
10. Положение о порядке создания и объёме испытаний демонстрационного двигателя-прототипа нового поколения для магистральных самолётов гражданской авиации, 2007 г.
11. Положение по методологии создания авиационных двигателей гражданского назначения, 2010 г.
12. Положение по методологии создания авиационных газотурбинных двигателей военного назначения 2007 г.
13. Типовая программа Государственных стендовых испытаний 2010 г.
14. РДК Обязательные виды и объёмы испытаний узлов авиационных двигателей, 2005 г.
15. РДК по выбору и проверке запасов газодинамической устойчивости авиационных силовых установок, 2005 г.
16. Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской (военной) авиации, 2004 г.
17. Общие технические условия на изготовление, ремонт, приемку и поставку авиационных серийных двигателей воздушных судов (ОТУ-2012), 2012 г.

