



# НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

## ДОКЛАД НА ПЛЕНАРНОМ ЗАСЕДАНИИ МФД-2014

**Владимир Иванович Бабкин**, генеральный директор ГНЦ "ЦИАМ им. П.И. Баранова", к.т.н., академик-секретарь секции "Аэрокосмическая" Российской инженерной академии



Добрый день уважаемые коллеги! Хочу поздравить вас с открытием Международного форума по двигателестроению.

Авиастроение - область, в которой в наибольшей степени проявляются возможности применения научных и инженерных достижений своего времени. И при этом, двигателестроение в общем спектре направлений авиационной деятельности, пожалуй - наиболее наукоёмкая



Рис. 1 Рост объема перевозок гражданской авиации

подотрасль. Именно в ней производство - прямое следствие проработанных научных и экспериментальных исследований. И нельзя забывать, что опытно-конструкторские работы тогда и только тогда имеют шанс на успешное завершение, когда предварительно добротнo спланированы и проведены научно-исследовательские работы и экспериментальная отработка элементов будущих двигателей летательных аппаратов.

**Двигатель создается в полтора - два раза дольше планера и авиационного оборудования.** И для того, чтобы он "попал" на новый самолёт, требуется опережающая отработка критических технологий.

ГНЦ ФГУП "Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова" (ЦИАМ), образованный в 1930 г., является ведущей организацией авиационной промышленности, обеспечивающей научно-техническое сопровождение развития авиадвигателестроения в России.

Сегодня ЦИАМ проводит комплексные фундаментальные и прикладные исследования в области авиадвигателестроения; испытания авиационных двигателей, их узлов и систем; разработку нормативно-правовых, методических и технических документов, определяющих методологию создания и сертификацию авиационных двигателей и энергетических установок на их основе.

Система этих документов поддерживается в актуальном состоянии, постоянно выходят их новые редакции, учитывающие как последние изменения документов более высокого уровня, так и развитие технологий отечественного двигателестроения. Примером своевременной разработки рациональных и вместе с тем жестких правил игры является созданный в 1984 г. ОСТ 2501, предусматривающий поэтапно-временной порядок создания и доводки технологий, узлов, экспериментальных газогенераторов и двигателей, и затем - ОКР. Применительно к современным условиям в 2010 г. утверждена подобная методология создания двигателя для гражданской авиации за счет госинвестиций, содержащая девять уровней технологической готовности, а по крупному - второй стадии НИЭР и ОКР.

ЦИАМ принимал участие в создании практических всех отечественных авиационных двигателей - от мощных и надежных поршневых моторов сороковых годов, до первого в мире лётного варианта двухрежимного водородного осесимметричного ГПВРД.

Газотурбинный двигатель (ГТД) по праву называют одним из трёх главных достижений научно-технической революции в XX веке, наряду с атомным проектом и выходом в Космос. Благодаря ГТД стали возможны массовые воздушные перевозки, трансконтинентальные перелеты, выработка огромного количества электроэнергии.

Стремительный рост объема воздушных перевозок (годовой темп - 6%, удвоение - каждые 15 лет) происходит при почти неизменных совокупных затратах топлива мировым парком самолетов. Это объясняется вводом в эксплуатацию самолетов с новыми двигателями, обла-

дающими более высокой топливной эффективностью (рис. 1).

Вместе с развитием аэродинамических компоновок и авиационных материалов уникальные свойства авиационного турбореактивного двигателя позволили за 60 лет с момента оснащения им первых пассажирских самолетов, в пять раз снизить затраты топлива на пассажирокилометр. При этом почти 50% снижения этого показателя получено за счет двигателя (рис. 2).

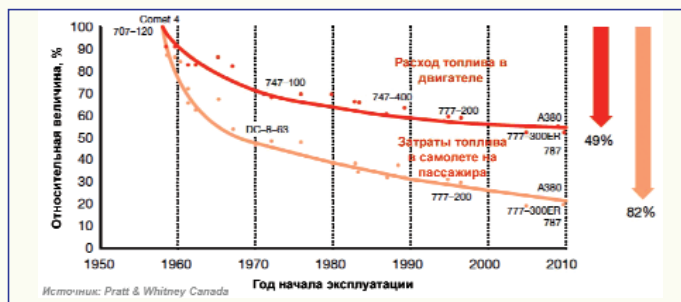


Рис. 2 Изменение удельного расхода топлива на перевозку одного пассажира

В запущенных с 2010 года программах ремоторизации самолетов А320 и В737 до 90% выигрыша в затратах топлива приходится на новые двигатели семейств PW1000G и LEAP, а на разрабатываемых новых самолетах МС-21 и китайском С919 - до 2/3 (рис. 3 и 4).

Непрерывное развитие гражданской авиации происходит на фоне постоянного ужесточения требований к снижению эмиссии вредных веществ и шума самолета, при этом основной инструмент достижения требуемых экологических характеристик - совершенствование силовых установок (рис. 5).



Рис. 3 Модернизируемые магистральные самолёты и их двигатели



Рис. 4 Новые магистральные самолёты России и Китая и их двигатели





Рис. 5 Ужесточение норм по выбросам для авиадвигателей

За период эксплуатации авиационных ГТД было создано пять поколений двигателей при кардинальном улучшении их показателей. В частности, удельный расход топлива сократился почти в два раза (рис. 6).

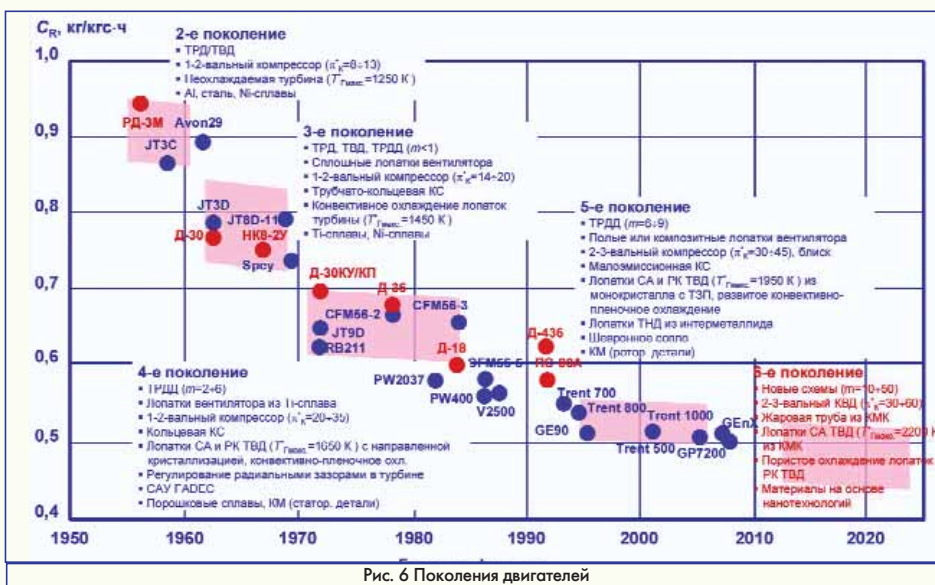


Рис. 6 Поколения двигателей

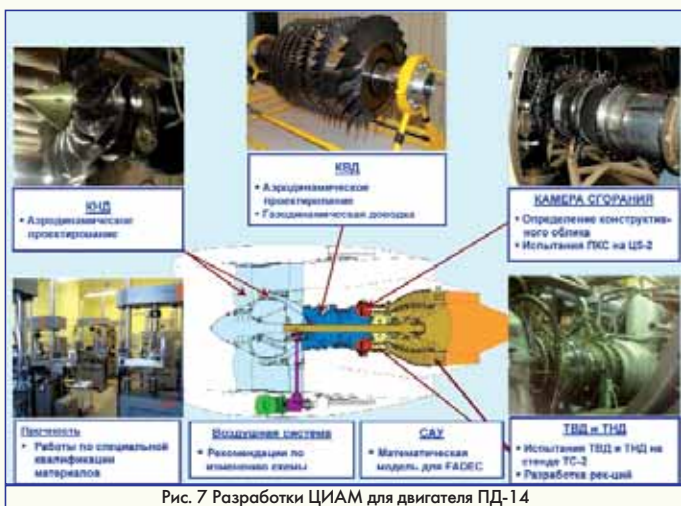


Рис. 7 Разработки ЦИАМ для двигателя ПД-14

Это было достигнуто благодаря переходу к новой схеме двигателя, повышению параметров рабочего процесса, внедрению новых конструкционных материалов и технологий.

Проведенные исследования по развитию авиационных ГТД, в том числе и в ЦИАМ, показали, что их потенциал еще далеко не исчерпан. Так, в соответствии с Flightrath 2050 (документ ACARE, устанавливающий целевые индикаторы для авиационной техники европейского производства к 2050 году) к 2050 г. затраты топлива на пассажирокилометр должны быть снижены в четыре раза.

Учитывая результаты работ в России (так же как и за рубежом) по снижению выбросов вредных веществ и шума, были разработаны целевые индикаторы, определяющие улучшение харак-

теристик перспективных силовых установок ЛА и самих летательных аппаратов по временному фактору, предполагающие дерзкие рубежи, как в ближней, так и дальней перспективе.

Разработка численных методов является одним из направлений создания перспективных технологий. В результате этих работ ЦИАМ решил многочисленные задачи по улучшению характеристик, оптимизации конструкции и повышению надежности авиационных двигателей и их узлов.

Разработанные высокоэффективные методы расчета для проектирования различных узлов двигателя учитывают нестационарные пространственные эффекты, переменность турбулентности по тракту двигателя, химическую кинетику и др. Эффективность этих методов верифицировалась по результатам модельных или натурных испытаний узлов двигателей на стендах ЦИАМ.

ЦИАМ продолжает развивать собственные численные методы для расчета сложных процессов, происходящих в силовой установке и двигателе.

Разработанный в ЦИАМ программный комплекс 3DAS предназначен для расчета тонального шума лопаточных машин в ближнем и дальнем поле. Метод расчета базируется на прямом численном решении трехмерных уравнений Эйлера для возмущений с использованием разностных схем высокого порядка точности. Точность результатов, полученных по этому методу превышает точность известных коммерческих пакетов.

Сегодня приоритетной задачей российского авиадвигателестроения является создание двигателя ПД-14, который разрабатывает ОАО "Авиадвигатель", для самолета МС-21. Этот двигатель нового поколения с высокой степенью двухконтурности является базовым для семейства двигателей в диапазоне тяги от ~90 до ~180 кН и разрабатывается на основе современных технологий проектирования и производства.

Научно-технический задел для ПД-14 создавался при активной роли ЦИАМ и мы надеемся, что это позволит реализовать высокие требования, предъявляемые к этому двигателю по экономичности, экологическим показателям, надежности и ресурсу и т.д. При участии ЦИАМ были спроектированы малозумный вентилятор с ширококордными лопатками рабочего колеса, компрессор высокого давления, жаровая труба камеры сгорания, разработана математическая модель для CAE FADEC. На основе результатов испытаний даны рекомендации по перепроектированию вентилятора, турбин высокого и низкого давления и т.д. (рис. 7).

В частности, в рамках отработки узлов двигателя ПД-14 в институте выполнено вначале азбродинамическое проектирование вентилятора с к.п.д. 92%, а затем - перепрофилирование его пустотелых лопаток рабочего колеса с целью отстройки от резонансов. Для обеспечения высокого уровня газодинамической устойчивости и улучшения акустических характеристик лопатки рабочего колеса имеют переменную по высоте стреловидность (рис. 8).

Для снижения эмиссии NO<sub>x</sub> и обеспечения большого заданного ресурса жаровой трубы в ЦИАМ разработаны продольные сегменты

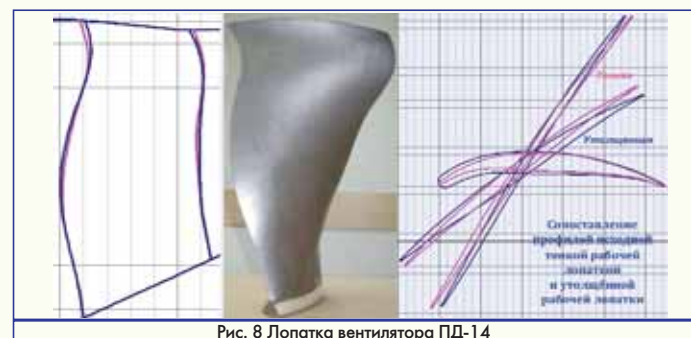


Рис. 8 Лопатка вентилятора ПД-14



новой конструкции с керамическим теплозащитным покрытием, что позволило сократить расход воздуха на ее охлаждение до 20% и увеличить расход воздуха через фронтное устройство.

Как было показано выше, к летательным аппаратам с двигателями 6-го поколения, появление которых ожидается после 2020...2025 гг., предъявляются высокие требования, как по топливной эффективности, так и по экологическим показателям. При этом достижение заявленных целевых индикаторов может быть реализовано только при комплексном подходе путем улучшения характеристик двигателя, летательного аппарата и управления воздушным движением.

Принимая во внимание целевые индикаторы, в ЦИАМ был проведен анализ перспективных схем двигателей для пассажирских самолетов нового поколения.

Сегодня в эксплуатации находятся летательные аппараты, в которых применяются "электрические" технологии. Применение таких технологий позволяет отказаться от ряда агрегатов и систем, а также от отборов воздуха на самолётные нужды. "Электрификация" двигателя и самолета позволяет уменьшить затраты топлива, прямые эксплуатационные расходы и повысить надежность.

В ЦИАМ на базе серийного двигателя для отработки "электрических" технологий создан двигатель-демонстратор. Особенности двигателя-демонстратора являются: электроприводные топливный насос, масляный насос, механизм поворота лопаток направляющих аппаратов компрессора, встроенный стартер-генератор и интеллектуальная распределенная САУ со SMART-датчиками. В ближайшее время планируется проведение испытаний магнитного подшипника.

Работы по этому направлению осуществляются совместно с ОАО "Электропривод", ОАО "ОМКБ", НПО "ЭРГА", ОАО "АКБ "Якорь" и др. Следует отметить, что применение электрических технологий и интеллектуальной распределенной САУ предполагается на всех двигателях, рассмотренных ниже.

В случае реализации высоких значений к.п.д. узлов при повышении параметров рабочего процесса и степени двухконтурности сохранит свою привлекательность ТРДД традиционной схемы, как с прямым (при величине степени двухконтурности меньше ~14), так и с редукторным (при величине степени двухконтурности больше ~14) приводом вентилятора. При этом в конструкции его узлов будут широко применяться композиционные материалы. Наибольший эффект ожидается от применения керамических композиционных материалов в "горячей" части двигателя, что позволит уменьшить затраты топлива и эмиссию вредных веществ (рис. 9).



Рис. 9 Критические технологии для двигателей 6-го поколения

В ЦИАМ ведутся исследования критических технологий для ТВВД ("открытый ротор"). При высокой топливной экономичности главной проблемой этого двигателя является повышенный по сравнению с ТРДД уровень шума. Одним из путей ее решения является проектирование биротативного винтовентилятора с разными диаметрами переднего и заднего винтов (по схеме "клиппинг") (рис. 10).

С учетом обобщения результатов работ по винтовентиляторам в европейской программе DREAM и использования численных мето-

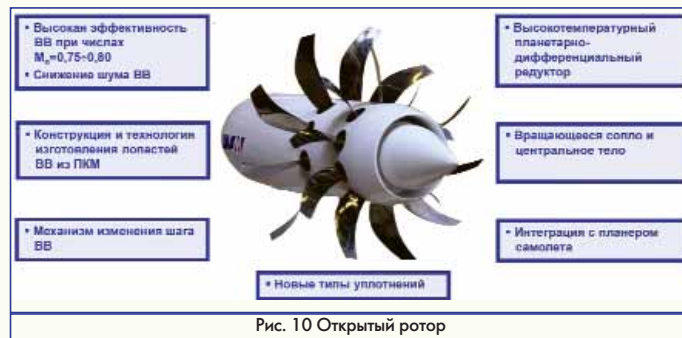


Рис. 10 Открытый ротор

дов решения прямой и обратной задач газодинамики и аэроакустики, в 2011...2012 гг. был разработан винтовентилятор COMBY, который в условиях крейсерского полета обеспечил к.п.д. 0,85 и позволил увеличить тягу на режиме "взлет" на 13% относительно исходного винтовентилятора по программе DREAM. Расчетные исследования показали, что уровни шума исходного винтовентилятора на режиме "взлет" сохранились на уровне винтовентиляторов, разработанных по программе DREAM (рис. 11).

Испытания, проведенные в ЦАГИ в 2012...2013 гг., подтверди-

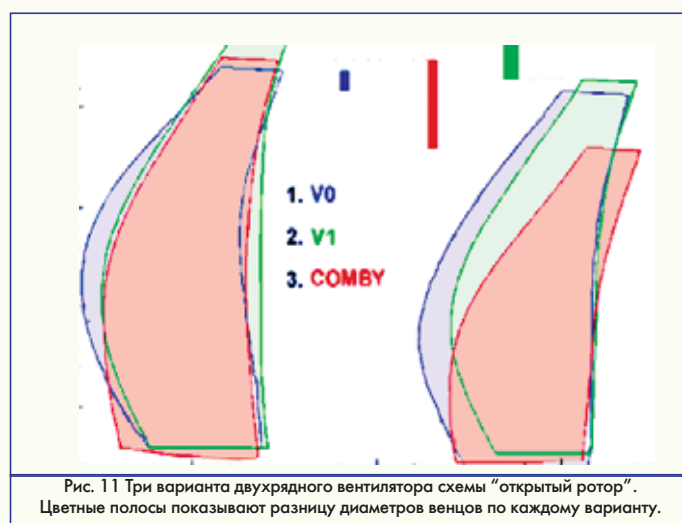


Рис. 11 Три варианта двухрядного вентилятора схемы "открытый ротор". Цветные полосы показывают разницу диаметров венцов по каждому варианту.

ли результаты расчетов и достижение поставленных целей.

След за ведущими двигателестроительными фирмами мира ЦИАМ в настоящее время активно работает над применением композиционных материалов, как в "холодных", так и в "горячих" узлах перспективных двигателей.

Принципиальное значение для всех двигателей с большой степенью двухконтурности имеет применение лопаток и корпуса вентилятора из полимерного композиционного материала, что позволяет не только заметно уменьшить массу двигателя, но и упростить решение комплекса вопросов, связанных с обеспечением работоспособности двигателя при обрыве лопатки вентилятора. Их планируется использовать не только в перспективных двигателях, но и в модификациях двигателей семейства ПД-14.

Для "горячих" узлов двигателей ведутся работы по жаровой трубе камеры сгорания и лопаткам турбины из керамических композиционных материалов. Так, для жаровой трубы и полых лопаток соплового аппарата турбины были проведены циклические испытания и испытания на термостойкость.

Наряду с двигателями, ЦИАМ занимается и промышленными газотурбинными установками на их основе. При непосредственном участии ЦИАМ разработаны целевые индикаторы, которым должны удовлетворять перспективные ГТУ, и определены направления их развития и критические технологии.

По заказу ОАО "Авиадвигатель" в ЦИАМ разработана маломощная камера сгорания для ГТУ-16, которая обеспечивает выбросы вредных веществ ниже 25 ppm (рис. 12).

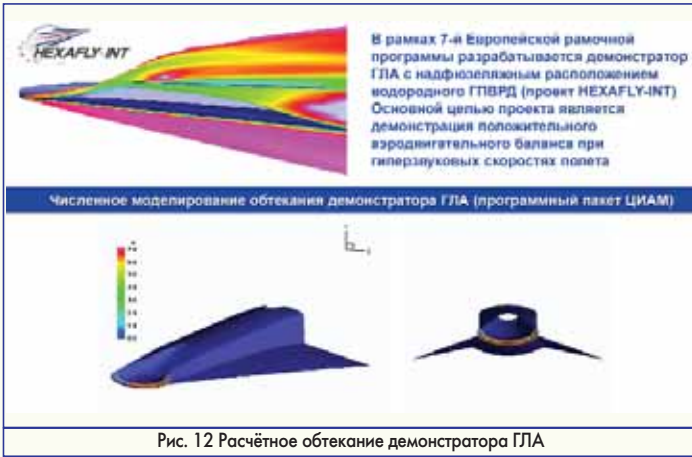


Рис. 12 Расчётное обтекание демонстратора ГЛА

И в заключение, несколько слов об экспериментальной базе ЦИАМ - Научно-испытательном центре, который является одним из крупнейших в Европе и позволяет проводить высотные испытания двигателей, их узлов и систем.

Спроектированные и изготовленные экспериментальные объекты проходят всестороннее экспериментальное исследование на стендах ЦИАМ, включая уникальные высотные стенды.

Для обеспечения готовности НИЦ ЦИАМ к проведению исследований и испытаний двигателей 6-го поколения проводится модернизация существующих технологических систем и высотных стендов и оснащение их высокоточными системами измерения, в том числе бесконтактными, создаются модельные стенды и установки для отработки критических технологий, а также развивается экспериментальная база прочностных исследований.

За последние годы созданы стенды для проведения испытаний на обледенение, акустических исследований моделей однорядных и биротативных вентиляторов, исследования лопаток на попадание птиц, исследование двигателей на огнестойкость и т.д. (рис. 13).

НИЦ ЦИАМ

- Расширение технологических возможностей НИЦ ЦИАМ для испытаний АД при наиболее полной имитации условий эксплуатации
- Создание стендов и установок для проведения испытаний АД и их узлов в экстремальных условиях
- Развитие методов и средств испытаний с широким применением ИР-технологий поддержки изделия

Обледенение, Шумоглушение, Прочность деталей из КМ, Птицестойкость, Огнестойкость, Разгонные испытания, Бесконтактные измерения

Рис. 13 Развитие экспериментальной базы ЦИАМ

Лаборатория огневых испытаний компонентов авиационной техники является единственной в России, имеющей аккредитацию Авиационного регистра и Росстандарта. В ней проводятся сертификационные испытания по подтверждению соответствия требованиям авиационных правил и квалификационным требованиям, относящимся к маршевым и вспомогательным двигателям, самолетам и вертолетам различного назначения, а также применяемым материалам.

Помимо воздействия пламени на стенде воспроизводятся различные эксплуатационные факторы: вибрации, обдув воздушным потоком, прокачка жидкости. Результаты испытаний в лаборатории признаются не только Авиационным регистром МАК, но и EASA. В настоящее время проводится модернизация стенда, которая позволит ему соответствовать новейшим требованиям отечественных и зарубежных нормативных документов и в полной мере провести сертификационные испытания по пожарной безопасности двигателя ПД-14 и самолета МС-21.

В ЦИАМ на основе высотных термобарокамер созданы и на протяжении длительного времени функционируют специальные экспериментальные стенды, предназначенные для проведения инженерных и сертификационных испытаний авиационной техники в условиях обледенения. Стенды позволяют имитировать условия атмосферного облака, содержащего жидкие переохлажденные капли. На указанных стендах выполняются сертификационные испытания полноразмерных двигателей, их моделей и деталей, входных элементов двигателя, а также элементов планера, как самолета, так и вертолета. Испытания выполняются в соответствии, как с российскими, так и с зарубежными нормативными требованиями (FAR-33, CS-E). В настоящее время проводится модернизация стендов с целью удовлетворения перспективным требованиям по обеспечению безопасности полетов в условиях ледяных кристаллов, смеси фаз и крупных переохлажденных капель.

В ЦИАМ несколько лет назад была создана и успешно функционирует уникальная физическая лаборатория. Она оснащена современными лазерно-оптическими системами диагностики неравновесных реагирующих потоков газа и плазмы. Это позволяет исследовать фундаментальные аспекты горения новых перспективных топлив, кинетику процессов с возбужденными молекулами, процессы формирования наноструктур с новыми физическими свойствами и интенсификацию процессов воспламенения и горения в различных системах (рис. 14, 15).

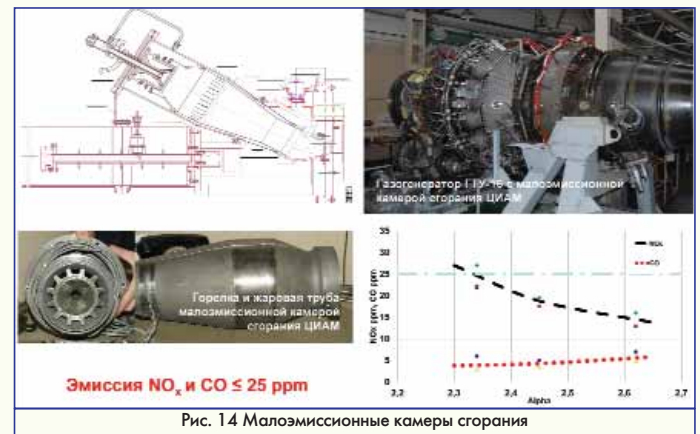


Рис. 14 Малоэмиссионные камеры сгорания

Методы измерения температуры и концентрации газовых компонентов, кластеров и сажевых частиц:

- Когерентная антистоксова рамановская спектроскопия (КАРС)
- Лазерно-индуцированная флуоресценция
- Эмиссионная спектроскопия
- Ионная масс-спектрометрия
- Хроматография

СН<sub>4</sub> + ВОЗДУХ

ФОТО, ОН (ЛИФ)

Рис. 15 Лаборатория горения

Представленные результаты работ ГНЦ ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова" показывают, что его деятельность по созданию научно-технического задела для авиационных двигателей 5-го и 6-го поколений создает потенциал российского авиадвигателестроения по разработке инновационной продукции и закладывает основу для обеспечения конкурентоспособности российской авиационной техники.