

О ПРОГРАММЕ СОЗДАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ СЕМЕЙСТВА САМОЛЕТОВ МС-21



А.А. Иноземцев,
доктор технических наук,
генеральный конструктор
ОАО «Авиадвигатель»

Представлены основные положения Программы создания семейства авиационных двигателей для магистральных самолетов МС-21. Базовым двигателем семейства является двигатель ПД-14, который по своим уникальным техническим параметрам относится к пятому поколению и будет конкурировать с перспективными двигателями ведущих западных фирм. Особое внимание уделено задачам научных исследований, в которых ученые Урала принимают активное участие. Показано, что научно-технический и коммерческий успех Программы определяется тем, насколько эффективно и всесторонне будут реализованы самые передовые научные достижения, новейшие вычислительные и информационные технологии.

Перед российской авиационной промышленностью поставлена задача войти в тройку мировых лидеров авиационной индустрии с достижением 10 % продаж мирового рынка гражданской авиатехники в период 2020–2025 гг.

Решение этой задачи планируется обеспечить за счет ввода в строй новых типов самолетов гражданского назначения: перспективного семейства ближне-среднемагистральных самолетов МС-21, среднемагистральных самолетов Ту-204СМ (глубокая модернизация Ту-204) и региональных самолетов семейства Superjet Sukhoi. Первые два типа самолетов планируется оснастить пермскими моторами.

В настоящее время Россия имеет

~ 1 % общего рынка продаж самолетов гражданского назначения. Российские авиакомпании эксплуатируют около 300 самолетов, сделанных в США или Европе, которые обеспечивают ~ 3/4 всего пассажирооборота России. Кроме того, власти Китая поставили перед своим авиапромом задачу также войти в первую тройку, негласно отведя России роль поставщика отдельных технологий. Таким образом, решение вышеупомянутой национальной задачи будет проходить в условиях бескомпромиссной конкурентной борьбы одновременно и с Западом, и с Востоком, не считая внутренних сил, ориентированных на импортную технику.

Цель статьи – проинформировать научно-инженерную и научно-образова-

тельную общественность Пермского края и Уральского отделения РАН об основных положениях Программы создания авиационных двигателей для МС-21, уделив особое внимание задачам научных исследований, в которых ученые Урала принимают содержательное участие.

Вышеупомянутая Программа предусматривает создание семейства турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД) в классе тяги от 9 до 18 тонн. Создание семейства двигателей осуществляется Объединенной двигателестроительной корпорацией (ОДК) – дочерней компанией ОАО «ОПК «Оборонпром». Впервые в выполнении проекта принимают участие практически все основные моторостроительные организации России, а также ведущие авиационные научные центры – ЦИАМ, ЦАГИ, ВИАМ, ВИЛС, что позволяет наиболее полно реализовать научный и технологический потенциал авиационной отрасли.

Важнейшей особенностью Программы является то, что все авиационные двигатели семейства создаются на базе унифицированного газогенератора (единого для всех двигателей семейства). На базе этого же газогенератора планируется создание ряда промышленных газотурбинных установок в классе мощности 6...30 МВт.

Базовым двигателем семейства является авиационный двигатель ПД-14 тягой 14 тонн для магистрального самолета МС-21-300, рассчитанного на перевозку 180 пассажиров. Наши маркетинговые исследования подтверждают, что двигатели тягой 14...15 тонн в мире будут выпускаться наиболее массово, речь идет о десятках тысяч моторов.

Предусмотрены также две основные модификации базового двигателя: ПД-14А – дросселированный вариант тягой 12,5 тонн для МС-21-200, рассчитанного на перевозку 150 пассажиров, и ПД-14М – форсированный вариант тягой 15,6 тонн для МС-21-400, рассчитанного на перевозку 210 пассажиров.

Создание семейства магистральных самолетов МС-21 осуществляет Объединенная авиастроительная корпорация. Ввод в эксплуатацию первых самолетов

семейства МС-21 намечен на 2016 год.

В двигателе ПД-14 планируется реализовать ряд целевых требований, обеспечивающих конкурентоспособность создаваемого двигателя с проектируемыми зарубежными аналогами:

- снижение удельного расхода топлива не менее чем на 10...15 % по сравнению с лучшими западными аналогами (двигатели CFM56-5B, V2500-A5), находящимися в эксплуатации;
- снижение суммарного уровня акустического шума самолета не менее чем на 15...20 EPN дБ относительно действующей главы 4 норм ИКАО;
- снижение эмиссии оксидов азота NO_x , не менее чем на 45 % относительно норм ИКАО 2008 года.

Для выполнения указанных целевых требований для ПД-14 принята безредукторная схема ТРДД без смешения потоков наружного и внутреннего контуров с высокими параметрами цикла: степень двухконтурности $m = 8,5$; суммарная степень сжатия $\pi^*_{k\Sigma} = 41$ (рис. 1).

Создание семейства авиационных двигателей для МС-21 предусматривает следующие основные этапы:

- создание унифицированного газогенератора (наиболее горячего и высокотехнологичного узла внутреннего контура);
- разработка и промышленное освоение новейших критических технологий и материалов;
- создание двигателя – демонстратора технологий (прототипа);
- создание полноразмерного базового двигателя семейства, сертификацию двигателя и его серийного производства.

Рассмотрим два первых этапа.

Создание унифицированного газогенератора

В настоящее время в ОАО «Авиадвигатель», являющемся системным интегратором проекта, и ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» проведен большой комплекс исследовательских и проектных ра-

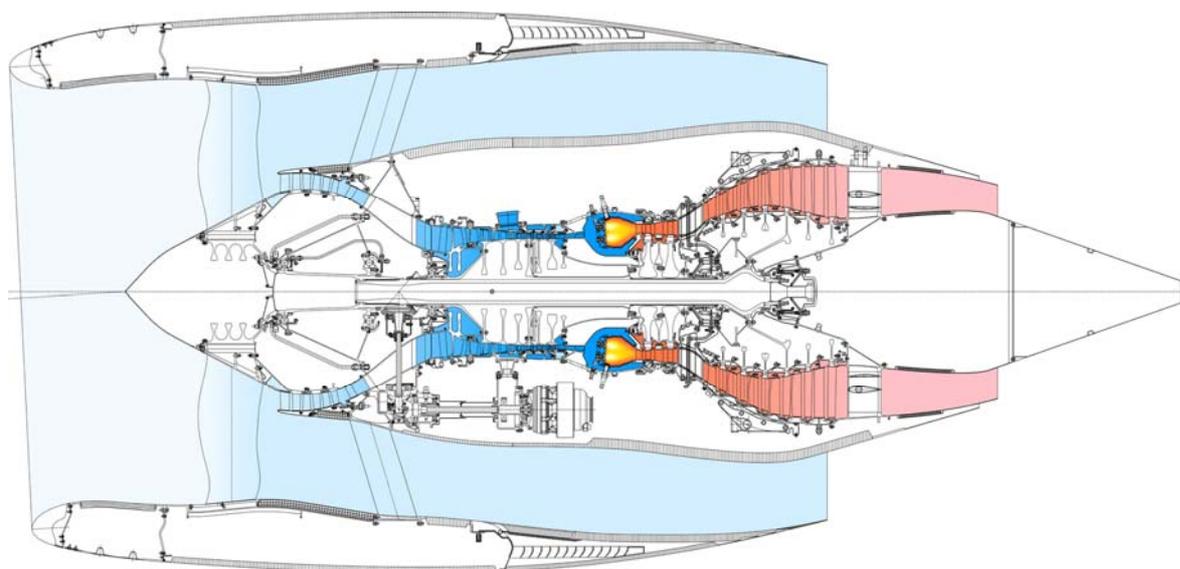


Рис. 1. Общий вид двигателя ПД-14

бот, включающий:

- термодинамическое проектирование двигателей, выбор оптимальной размерности и параметров унифицированного газогенератора;
- аэродинамические, тепловые и прочностные расчеты основных узлов двигателя;
- экспериментальные исследования полноразмерной камеры сгорания, высоконагруженных ступеней компрессора и турбины на автономных стендах.

Принципиально новым здесь является то, что уже на начальном этапе проектирования осуществляется многовариантное исследование нестационарных, нелинейных процессов в авиационных двигателях на основе применения высокоуровневых математических моделей (уравнения Навье–Стокса, низкодиссипативная разностная схема, многодисциплинарный анализ).

В этом аспекте следует отметить решение следующих задач: оценка вибронапряжений в лопатках турбомашин, вызванных газодинамическим статор-ротор-взаимодействием; применение сопряженной постановки (газ – твердое тело) для расчета теплового состояния охлаждаемых лопаток турбин; моделирование термомеханического поведения полимерных композитных конструкций, моделирование процессов генерации и распространения акустических пульсаций по тракту

двигателя и в области его ближнего поля.

Отдельным важным направлением является моделирование физико-химических процессов в камерах сгорания (турбулентность, химическая кинетика, теплообмен излучением) с учетом трехмерных нестационарных особенностей потока. Разрабатываются специализированные методики и подходы, позволяющие в рамках коммерческого программного обеспечения ANSYS-CFX получить высокий уровень точности моделирования таких процессов. Это дает возможность проводить численные исследования различных конфигураций камер сгорания с целью максимально возможного улучшения экологических характеристик двигателя.

Глубокий уровень численного моделирования, учет трехмерных и нестационарных особенностей исследуемых процессов, решение многодисциплинарных задач стали возможны благодаря широкому применению быстродействующих вычислительных систем. Так, суммарная пиковая производительность вычислительных кластеров ОАО «Авиадвигатель» на сегодня составляет 8,3 TFlops. Всего около двух тысяч персональных компьютеров предприятия объединены в сеть, обеспечивая решение задач в пакетах ANSYS, ANSYS-CFX, ANSYS-Fluent, LS-DYNA и конструкторской системе NX. Такой подход позволил поднять культуру

проектирования турбомашин на качественно новый уровень. Подробно о новой системе проектирования турбомашин изложено в монографиях [9, 14, 18, 11, 13].

В настоящее время в ОАО «Авиадвигатель» в CAD/CAM системе NX завершен выпуск рабочей конструкторской документации на демонстрационный газогенератор. Управление структурой и сборкой изделия осуществляли в информационной PDM-системе Teamcenter [8].

Особенностью реализации проекта ПД-14 является территориально распределенное взаимодействие между его участниками в электронном виде в среде Teamcenter Multisite Collaboration, которое впервые реализовано в практике двигателестроительных предприятий России.

В частности, изготовление моноколес первой и второй ступеней компрессора по технологии «blisk» (лопатки выполняются с диском как одно целое) осуществлено в ОАО «Авиадвигатель». Изготовле-

для всемирно признанных боевых самолетов марки Су. Монокристаллические рабочие лопатки первой и второй ступени турбины из жаропрочных сплавов ВЖМ4, ВЖМ5 отлиты по уникальной технологии ФГУП «ВИАМ» в ОАО «Пермский моторный завод» – единственном в РФ серийном изготовителе ТРДД четвертого поколения для гражданской авиации. Здесь же, на «ПМЗ», изготовлены детали статора компрессора, камеры сгорания и турбины. Зубчатые передачи центрального конического привода произведены в ФГУП «МПП «Салют», имеющем лучшее в отрасли зуборезное оборудование, а выходное устройство – в ОАО «НПП «Мотор», г. Уфа.

В настоящее время сборка демонстрационного газогенератора полностью завершена. 26 ноября 2010 года в ОАО «Авиадвигатель» успешно произведен его первый запуск и начаты испытания (рис. 2).

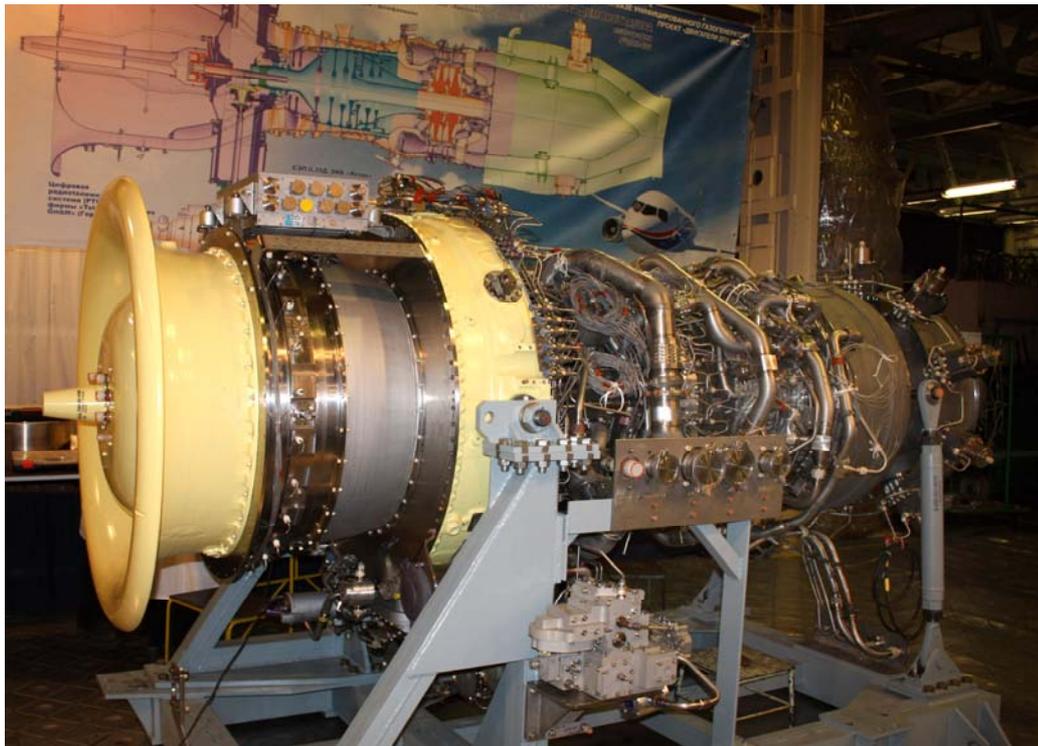


Рис. 2. Газогенератор-демонстратор ПД-14 перед началом испытаний

ние других ступеней и сборка ротора компрессора выполнено в «Уфимском моторостроительном производственном объединении» (УМПО) – крупнейшем серийном производителе авиадвигателей

Основной целью испытаний демонстрационного газогенератора является подтверждение расчетных данных, в том числе по удельному расходу топлива, отработка ряда новых материалов и технологий.

Разработка и промышленное освоение новейших критических технологий и материалов, необходимых для создания полноразмерного двигателя

Мировой и многолетний собственный опыт показывает, что коммерческий и научно-технический успех любой программы авиационных двигателей во многом определяется тем, насколько эффективно и всесторонне будут реализованы самые передовые научные достижения, прогрессивные конструкторские и производственные решения мирового уровня.

Для снижения возможных технических рисков проекта предусмотрено опережающее промышленное освоение критических технологий и новых материалов, без которых невозможно обеспечить конкурентоспособность ПД-14 на мировом рынке. Всего выделено 20 таких технологий. Подробнее остановимся на тех, в которых ученые Урала принимают самое непосредственное участие.

1. Разработка конструкции и технологии изготовления облегченной широкохордной лопатки вентилятора.

Облегченная широкохордная лопатка вентилятора с переменной стреловидностью является ключевым элементом авиационного двигателя с высокой степенью двухконтурности.

Необходимость в такой лопатке обусловлена требованием по снижению общей массы двигателя с одновременным повышением напорных характеристик вентилятора и запасов его газодинамической устойчивости.

Кроме того, согласно нормам летной годности, конструкция двигателя должна обеспечивать локализацию возможной поломки вентиляторной лопатки, например после попадания крупной птицы на вход воздухозаборника. В подобной ситуации непробиваемость корпуса при минимальной массе баллистической защиты обеспечивается снижением веса лопатки.

В настоящее время в России отсутствуют технология и производство облегченных лопаток вентилятора. Для изго-

товления полый лопатки вентилятора из титанового сплава Ti-6Al-4V (российский аналог – титановый сплав BT6) на двигателе Trent фирмы «Rolls-Royce» используется технология, базирующаяся на процессах диффузионной сварки и сверхпластической формовки. При этом технологические операции сварки и формовки выполняются при высоких температурах: $T = 900 \dots 950^\circ\text{C}$, а компоненты лопатки – обе обшивки и листовой наполнитель – характеризуются исходной микроструктурой с размером зерен $d = 5 \dots 10$ мкм.

Однако, как показывают исследования Института проблем сверхпластичности металлов ИПСМ РАН (г. Уфа), указанная микроструктура не позволяет осуществлять операции сварки и формовки при более низких температурах из-за ограниченной технологической пластичности листового наполнителя. В то же время использование высоких температур приводит к образованию на поверхности обшивок хрупкого альфированного (газонасыщенного) слоя, для удаления которого требуются трудоемкие и экологически опасные операции [10].

В рамках проекта предусматривается создание серийного производства титановой полый лопатки вентилятора из сплава BT6 с использованием в качестве наполнителя наноструктурного титанового листа с размером зерен $d = 100 \dots 500$ нм. Это позволит создать существенную разницу в пределе текучести материалов и наполнителя, осуществить качественное соединение компонентов лопатки диффузионной сваркой при относительно низкой температуре: $T = 650 \dots 700^\circ\text{C}$, обеспечить требуемый ресурс пластичности для формирования ребер жесткости при формовке в интервале $T = 700 \dots 750^\circ\text{C}$.

Поскольку для производства полый лопатки вентилятора требуется наноструктурный листовой полуфабрикат из титанового сплава, одной из задач проекта является разработка технологии изготовления такого полуфабриката, которая заключается в «теплой» прокатке предварительно полученных объемных наноструктурных заготовок. Для получения таких заготовок предполагается использование

метода всесторонней изотермическойковки, обеспечивающего однородную наноструктуру во всем объеме материала [10, 15].

Конструкцию полой лопатки вентилятора (рис. 3) разрабатывает ОАО «Авиадвигатель» совместно с ЦИАМ.

патки – снижение массы рабочего колеса вентилятора на 30 %, как следствие, снижение массы других деталей компрессора низкого давления на 10...15 %, снижение массы бронезащиты и уменьшение дисбаланса ротора при возможном обрыве лопатки из-за попадания крупной птицы на

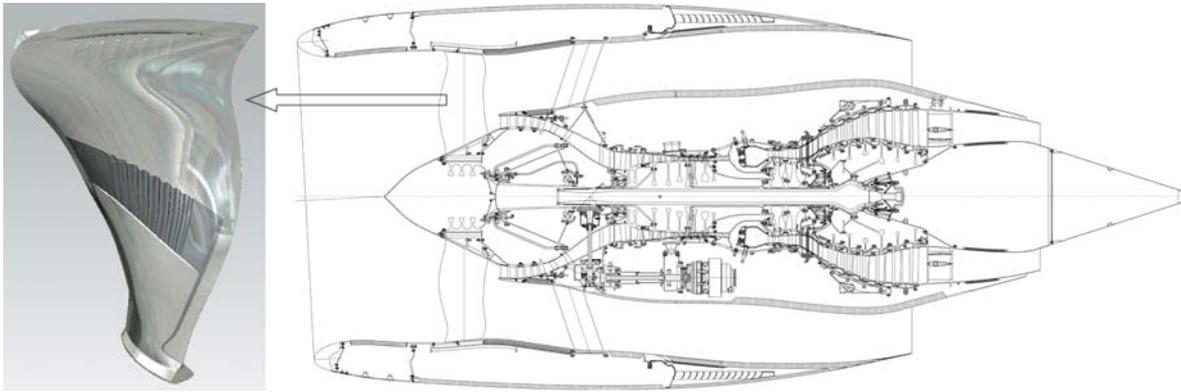


Рис. 3. Внешний вид вентиляторной лопатки ПД-14

Разработка технологического процесса изготовления опытной полой лопатки вентилятора будет осуществлена ОАО «УМПО», ИПСМ РАН, ОАО «Авиадвигатель», ОАО «Корпорация ВСМПО–АВИСМА» (г. Верхняя Салда, Свердловская область / г. Березники, Пермский край).

В настоящее время отрабатываются технологии изготовления на предсерийной лопатке, изготовлена партия модельных лопаток (рис. 4), в том числе для проведения усталостных испытаний.

Эффект от внедрения облегченной ло-

вход в двигатель.

Ввиду того, что полая лопатка вентилятора ПД-14 должна обеспечивать работоспособность в течение 40 000 полетных циклов (80 000 часов), актуальными являются исследования сопротивления сплава ВТ6 ударно-волновым нагружениям, а также много- и гигацикловой усталости.

Исследования термодинамических закономерностей деформирования и разрушения сплава ВТ6 ведутся в Институте механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь) под руководством академика В.П. Матвеевко и проф. О.Б. Наймарка. Исследования структуры позволят связать динамику поведения ВТ6 и особенности поведения деформационных текстур в процессе эксплуатации ПД-14. Для исследования поведения материалов в области гигацикловой усталости используется установка, расположенная в г. Бордо (Франция).

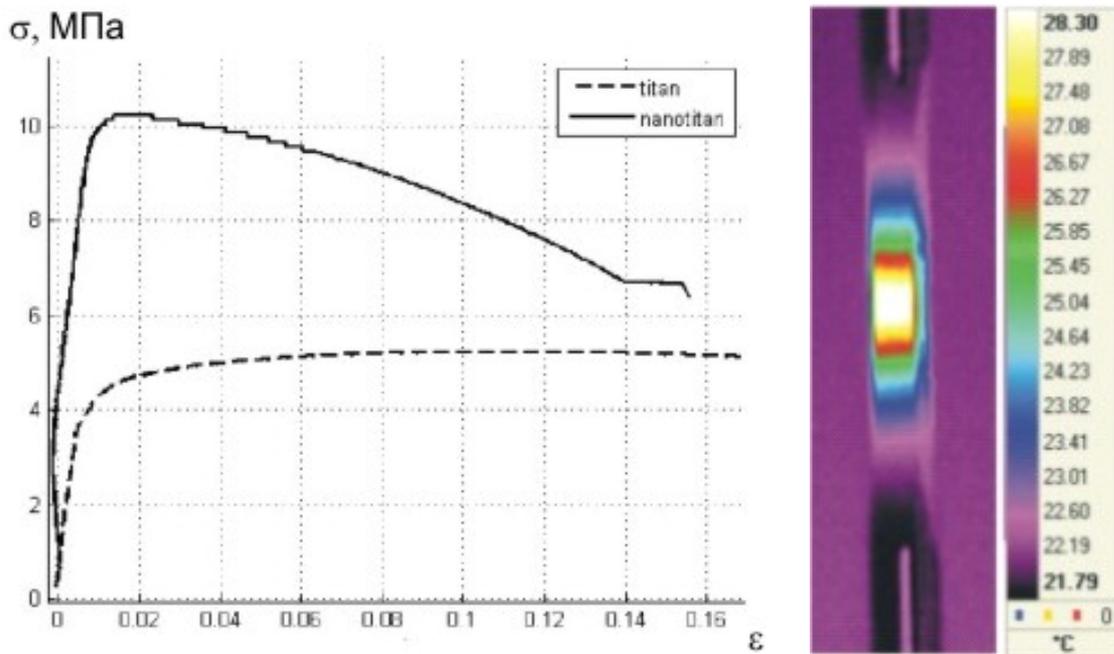
В соответствии с теоретическими результатами, предсказавшими эффект аномального поглощения механической энергии в материалах в объемном субмикроструктурном состоянии, получено экспериментальное подтверждение эффекта аномального поглощения при сравнительном анализе титана (в обычном и субмикроструктурном состоя-



Рис. 4. Модельная полая лопатка вентилятора с наполнителем из наноструктурного титанового сплава

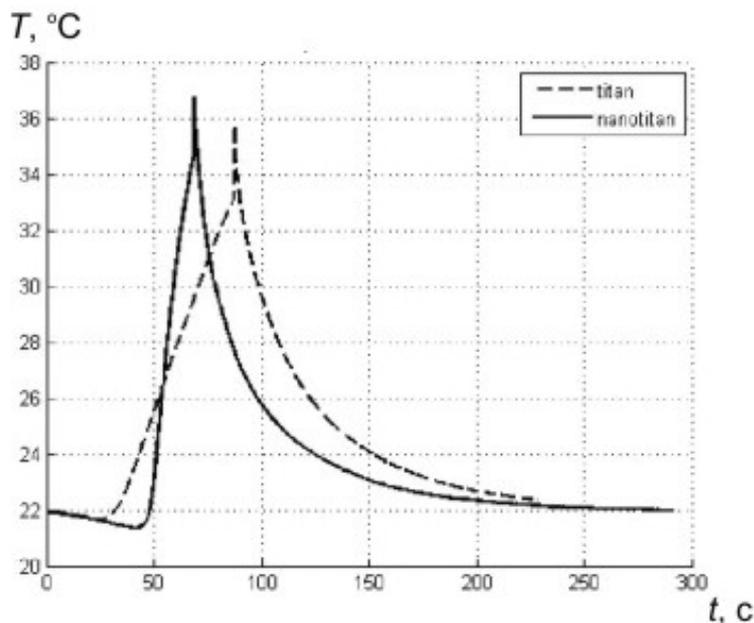
нии, характерный размер зерна 25 мкм и 0,30 мкм соответственно) при квазистатических, циклических и динамических нагрузениях (рис. 5). Исследование термо-

ских характеристик материала и изменению его деформационного поведения при квазистатическом деформировании. Показано, что переход к субмикрострук-



a

б



в

Рис. 5. Деформационные кривые при квазистатическом нагружении крупнозернистого и нанокристаллического титана (а), распределение температуры на поверхности пластически деформируемого образца (б), изменения средней температуры рабочей части образцов из крупнозернистого и нанокристаллического титана (в)

динамики процесса деформирования проводилось с использованием записи эволюции поля температур инфракрасной камерой CEDIP Jade III [16, 19]. Эксперимент показал, что измельчение зерна приводит к существенному росту механиче-

лическому состоянию сопровождается аномалиями поглощения механической энергии, что характерно для поведения неравновесных критических систем.

С данными закономерностями связываются парадоксы механического поведе-

ния объемных нанокристаллических материалов.

Применение «in-situ» инфракрасной термографии позволило впервые исследовать процесс диссипации энергии при циклическом и динамическом деформировании поли- и субмикрорекристаллического титана. Разрушение нанокристаллических образцов в ходе циклического нагружения имело квазихрупкий характер и происходило при амплитуде напряжений на 35–40 % большей, чем для титана в обычном поликристаллическом состоянии. Анализ данных, приведенных на рис. 6, подтверждает вывод о качественном различии механизма диссипации энергии и разрушения для поликристаллического и субмикрорекристаллического титана. Материал с мелким зерном не позволяет трактовать предел усталости как величину напряжения, приводящую к качественному изменению механизмов структурной релаксации, которые начи-

нают носить выраженный многомасштабный характер на заключительной стадии деформирования. Рост интегральной мощности источников тепла, вызванных эволюцией структуры материала, прямо пропорционален энергии (квадрату амплитуды напряжений), затрачиваемой на деформирование образца для всех исследованных значений приложенного напряжения. Данный факт характеризует способность нанокрорекристаллического материала эффективно задействовать структурный (конфигурационный) канал поглощения энергии, вовлекая в этот процесс весь нанокристаллический объем. Динамические испытания субмикрорекристаллического титана при скоростях деформации $(2-5) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, совмещенные с инфракрасным сканированием (см. рис. 6), также обнаружили эффекты аномального поглощения механической энергии. Впервые установлено, что измельчение зерна приводит к созданию в

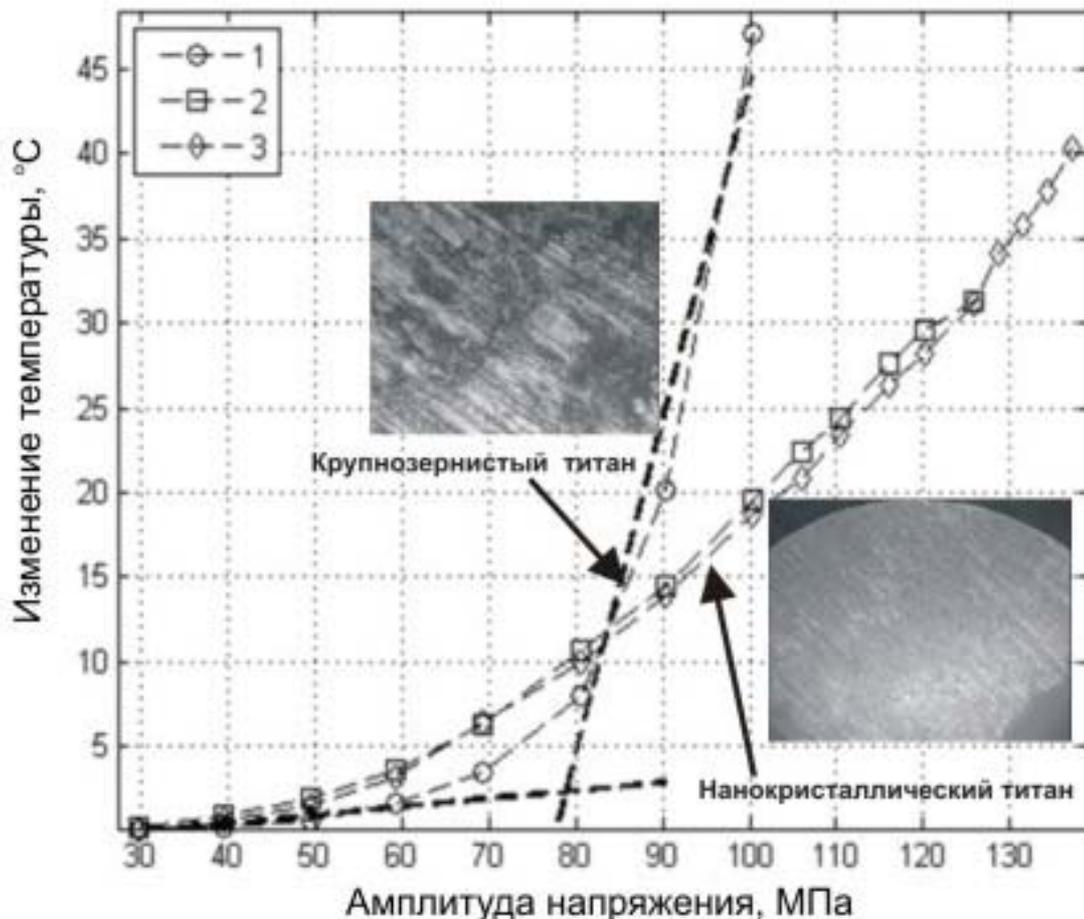


Рис. 6. Изменение средней температуры титановых образцов в крупнозернистом (кривая 1), нанокристаллическом (кривые 2, 3) состоянии в зависимости от среднего напряжения при циклическом нагружении

материале нового механизма диссипации энергии, работающего одинаково эффективно при различных скоростях деформации и интенсивностях воздействий.

Результаты обоих циклов экспериментальных исследований свидетельствуют о способности нанокристаллического материала более эффективно задействовать структурный (конфигурационный) канал поглощения энергии при его деформировании, вовлекая в этот процесс весь деформируемый объем. Этим же объясняется «квазихрупкий» характер разрушения нанокристаллических материалов, происходящий вследствие формирования локального связного кластера зернограничных дефектов.

Полученные результаты явились обоснованием для использования данного материала, обнаруживающего свойство «толерантности» к случайным динамическим нагрузкам как конструкционного в авиа-

тилятора, опирающееся на анализ их модальных характеристик – собственных частот и форм колебаний. Имеющийся опыт анализа модальных характеристик сплошных лопаток для этого *недостаточен*.

На кафедре «Авиационные двигатели» Пермского государственного технического университета под руководством проф. М.Ш. Нихамкина совместно с ОАО «Авиадвигатель» ведутся исследования, направленные на изучение особенностей модальных характеристик полых вентиляторных лопаток [12, 17]. Разработана методика экспериментального исследования собственных частот и форм колебаний полых лопаток вентилятора с гофрированным наполнителем, базирующаяся на комплексном использовании двух методов модального анализа: трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии и ударном модальном анализе (рис. 7).



Рис. 7. Исследование собственных частот и форм колебаний модельной полых лопатки вентилятора с помощью трехкомпонентного сканирующего лазерного вибromетра PSV-400-3D

ционных газотурбинных двигателях нового поколения с повышенным усталостным ресурсом. Однако «квазихрупкий» характер перехода к разрушению предполагает разработку качественно новых подходов и моделей, методов их экспериментальной и структурной верификации при оценке критических состояний.

Важную самостоятельную проблему представляет исключение опасных резонансных вибраций рабочих лопаток вен-

Методика позволяет исследовать собственные частоты и формы колебаний полых лопатки в диапазоне частот от 10 Гц до 20 кГц. Полученные результаты – спектры собственных частот и собственные формы колебаний (рис. 8, 9), используются для верификации и идентификации расчетных методик. В результате проведенных работ выявлено и подтверждено экспериментально существование у полых лопаток специфических высоко-

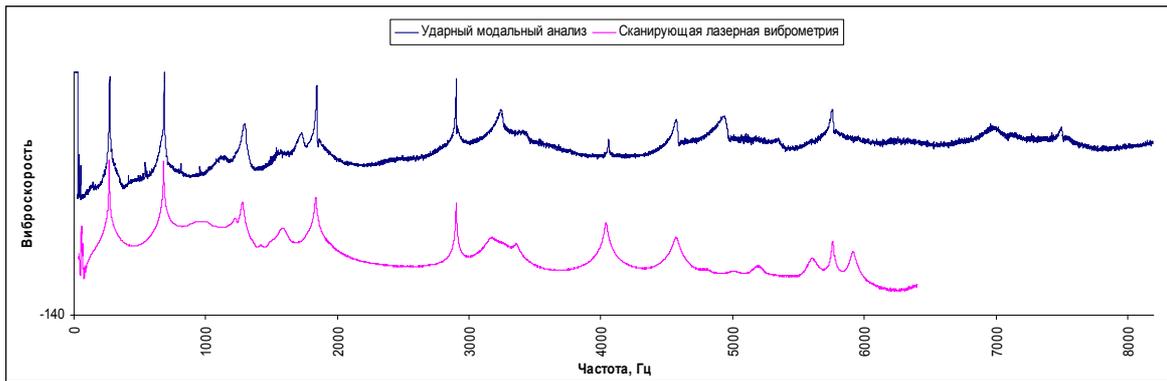


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика модельной полой лопатки, полученная методами сканирующей лазерной виброметрии и ударного модального анализа

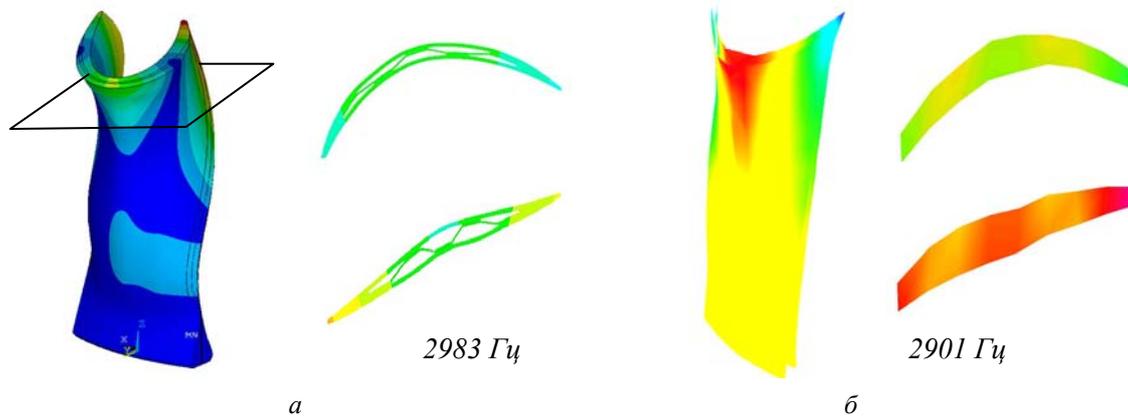


Рис. 9. Пластинчатая собственная форма колебаний, полученная конечно-элементным модальным анализом (а) и экспериментально (б) методом сканирующей лазерной виброметрии (поперечное сечение показано в двух противоположных фазах колебаний)

частотных форм колебаний, характеризующихся эффектами локальной деформации оболочек спинки и корыта профиля между ребрами жесткости гофрового наполнителя (см. рис. 9). Эти эффекты могут привести к возникновению значительных переменных напряжений в зонах сварных соединений оболочек и гофрового наполнителя.

Из указанной выше проблемы обеспечения непробиваемости корпуса вентилятора неизбежно вытекает спектр задач, связанных с необходимостью моделирования быстротекающих высоконелинейных процессов ударного взаимодействия. Условия сертификационных испытаний таковы, что лопатка вентилятора должна выдерживать попадание птицы массой 2,7 кг, а корпус вентилятора должен выдерживать удар оборвавшейся лопатки, имеющей кинетическую энергию около 220 кДж. Для примера: схожую энергию имеет джип, движущийся со ско-

ростью 60 км/ч.

Для создания математических моделей подобных процессов необходимо, в частности, исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов при скоростях деформирования $10^3 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$, так как на этих скоростях характеристики прочности и пластичности существенно образом отличаются от статических значений.

Такие исследования ведутся в ИМСС УрО РАН под руководством проф. О.Б. Наймарка на установке, реализующей высокоскоростное растяжение по методу Гопкинсона–Кольского. По импульсам, замеряемым на мерных стержнях, восстанавливаются кривые деформирования материала при повышенных скоростях с последующей их аппроксимацией и формулированием критериев разрушения для применения в математических моделях.

Фундаментальные и прикладные ис-

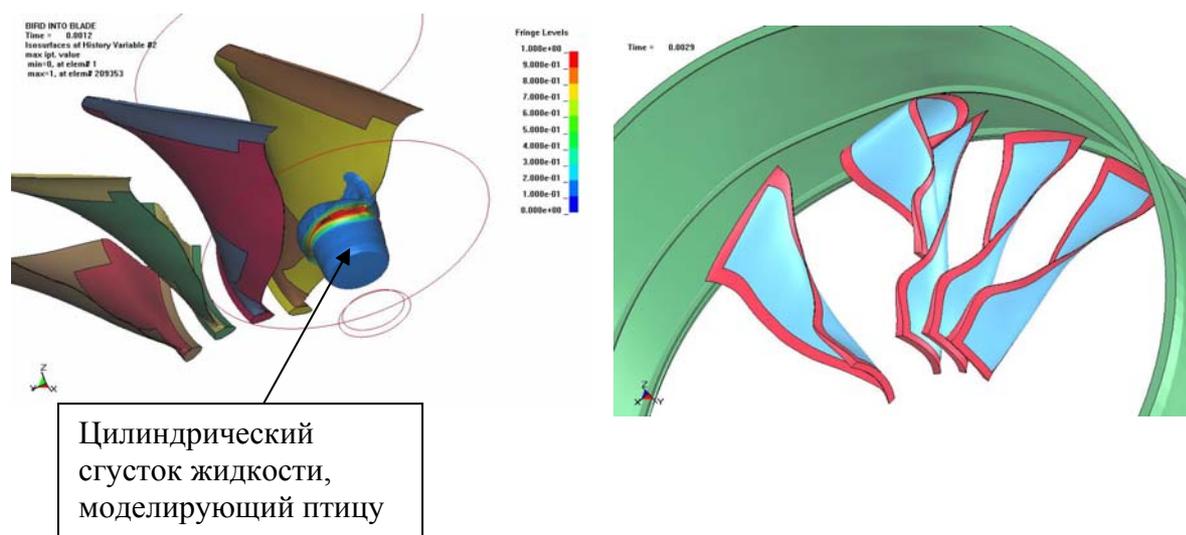


Рис. 10. Модель попадания крупной птицы на вход двигателя и модель удара лопатки вентилятора в корпус двигателя

следования ученых ИМСС УрО РАН и ОАО «Авиадвигатель» по изучению закономерностей сопротивления перспективных материалов авиационного двигателя случайным нестационарным воздействиям поддержаны грантом РФФИ № 09-08-99097-р_офи.

2. Разработка технологии изготовления деталей камеры сгорания из жаростойких наноструктурированных композиционных материалов типа C-SiC. Минимизации вредных выбросов.

Целью работы, выполняемой совместно с ФГУП «ВИАМ» и ОАО «Уральский НИИ композиционных материалов»

(г. Пермь), является создание элементов горячей стенки камеры сгорания из композиционного материала (рис. 11) на основе волокнистого каркаса и керамической карбидкремниевой матрицы, модифицированной наночастицами (функционализированные углеродные нанотрубки; нанотрубки, покрытые карбидом кремния; карбидокремниевые сферы).

Предполагается, что добавление наночастиц в состав композита на микроуровне способствует «залечиванию» дефектов структуры карбидкремниевой матрицы и тем самым приведет к повышению трещиностойкости материала. Таким образом, будет обеспечен длительный ресурс

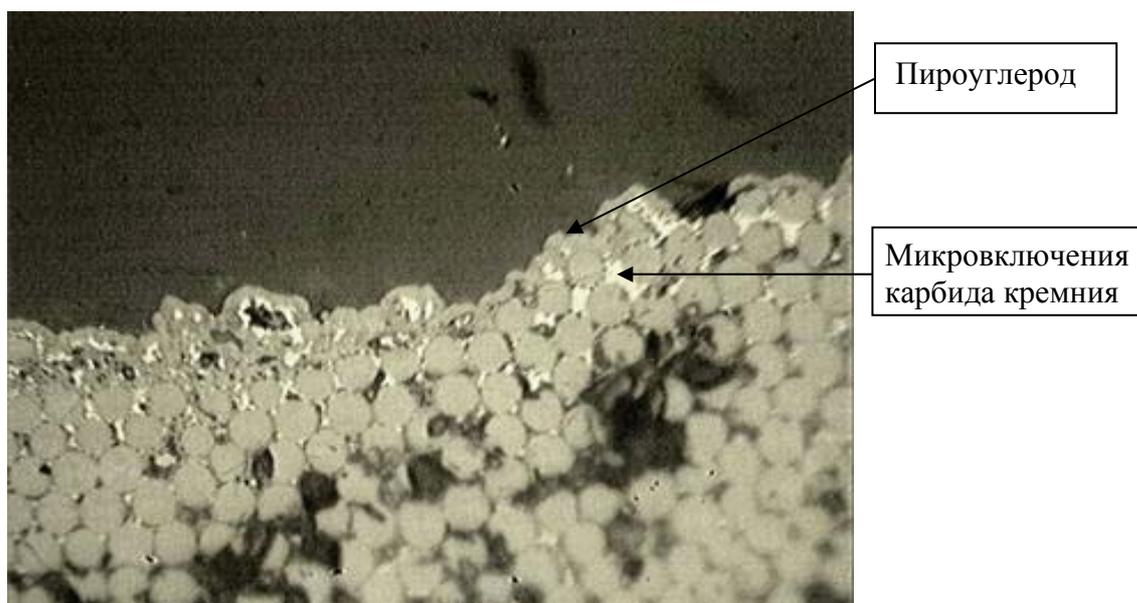


Рис. 11. Микроструктура композиционного материала (печатается с разрешения УНИИКМ)

эксплуатации камеры сгорания (до 30 000 часов) в высокотемпературной

полю частиц топливного аэрозоля осуществляется при помощи воздушного пото-



Рис. 12. Модельные элементы жаровой трубы из углерод-углеродного композиционного материала

среде (до 2 100 К) с высоким содержанием кислорода.

Не менее значим системный эффект по двигателю. Так, изготовление деталей камеры сгорания из композиционной керамики позволит высвободить существенное количество воздуха (до 20 %), подаваемого из компрессора на охлаждение корпуса камеры, и направить его непосредственно на горение. Это даст возможность уменьшить максимальные уровни температур в зоне горения и, соответственно, понизить термическую эмиссию оксидов азота NO_x (NO , NO_2 , N_2O) согласно механизму Я.Б. Зельдовича [5]. Таким образом, одновременно с сохранением напорности компрессора обеспечиваются высокие экологические параметры двигателя в целом. Кроме того, применение материала с низким удельным весом позволит снизить вес камеры сгорания на 10...15 %.

Другой проблемой создания кольцевой камеры сгорания ПД-14 (диффузионного типа) является обеспечение требуемого качества распыла топлива на всех режимах работы двигателя с одновременным существенным увеличением ресурса и надежности топливных агрегатов.

Одним из путей решения данной проблемы является применение пневматических форсунок с низким перепадом давления топлива в топливных коллекторах (не более 25 кгс/см^2 для условий взлетного режима). В таких форсунках распыл топлива и формирование равномерного

ка, набегающего на струю или пленку топлива, что приводит к ее быстрому разрушению и формированию аэрозоля. При этом образуется облако распыленного топлива, позволяющее сформировать более равномерную топливоздушную смесь, по сравнению с форсунками с «механическим» распыливанием.

Сегодня, благодаря интенсивному развитию оптических методов исследования структуры многофазного потока, появилась возможность получения детального знания полей скорости в каналах, а также характеристик отдельных фаз потока в самой камере сгорания.

Задача исследования процесса распыливания решается совместно с ИМСС УрО РАН под руководством проф. П.Г. Фрика. Уже сейчас проделан большой объем работ по исследованию распыливания топлива. В частности, изучено влияние вариаций конструктивных элементов форсунки на процесс распыливания. Среди исследованных вариантов было выбрано оптимальное конструктивное исполнение, которое в настоящее время проходит натурное испытание в составе модельной установки полноразмерной камеры сгорания ПД-14. Разработана и отлажена методика проведения измерений с помощью цифровой трассерной визуализации PIV – Particle Image Velocimetry (рис. 13). При этом установлено, что характерный размер частиц топливоздушной смеси составляет 50 мкм (рис. 14).

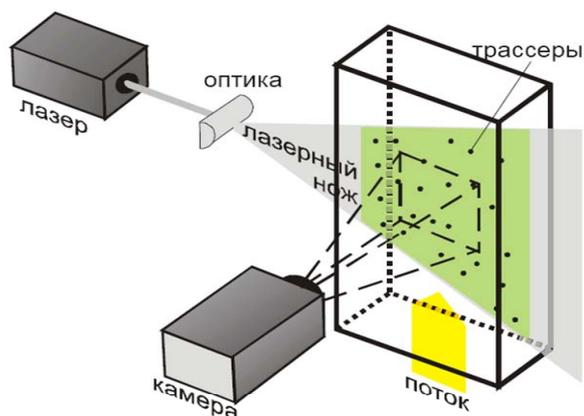


Рис. 13. Вид лазерной установки по технологии PIV и схема эксперимента

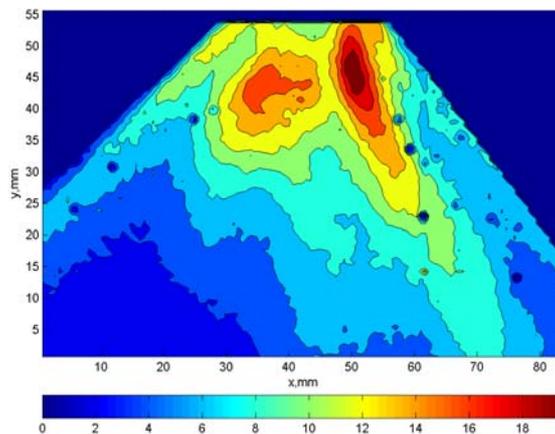
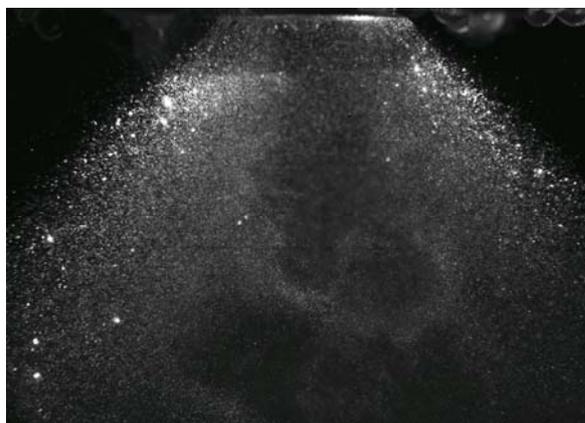


Рис. 14. Мгновенный снимок распыленной жидкости и осредненное поле модуля скорости

Разработанная методика была представлена и получила положительные оценки на представительной конференции, посвященной инновациям в аэрокосмической отрасли, а также на международной конференции, посвященной оптическим методам измерений [6, 7].

В настоящее время идет отработка новой методики IPI (Interferometric Particle Imaging), которая позволит определить

размеры капель в более широком диапазоне величин (от 10 до 1000 мкм), точнее установить функцию их распределения по размерам для различных скоростей.

На рис. 15, а представлено характерное для IPI метода поле образов частиц. Образы получены в результате интерференции бликов на каплях в потоке из форсунки. В результате обработки можно восстановить размеры частиц и их распо-

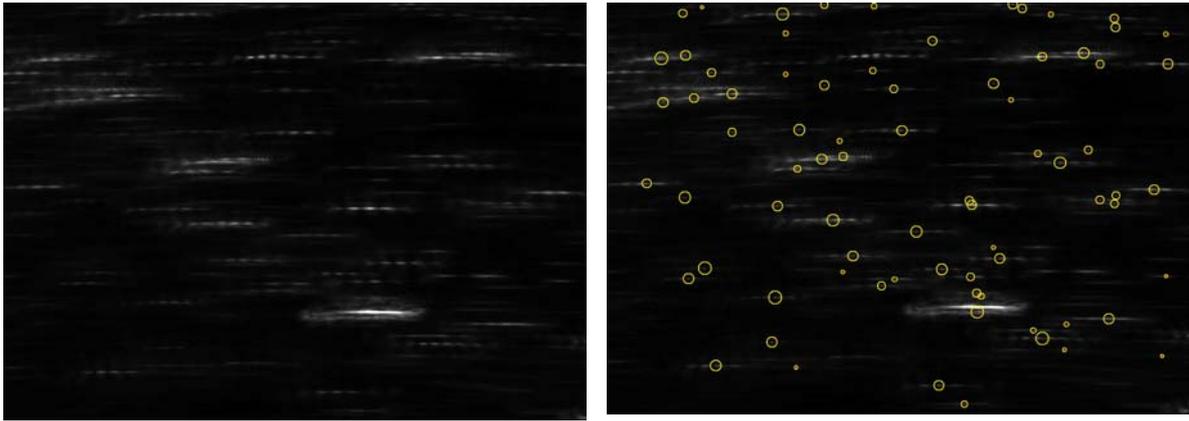


Рис. 15. Поле образов частиц (а) и результат обработки данного поля методом IPI (б)

ложение. Желтыми кругами (см. рис. 15, б) показаны положения и размеры капель, полученных в ходе процедуры восстановления размеров капель по их интерференционным образам.

В дальнейшем планируется продолжить сотрудничество с ИМСС УрО РАН при разработке математической модели распыливания топлива (в Лагранжевой постановке) для перспективных фронтальных устройств, которые позволят обеспечить выполнение перспективных норм ИКАО 2026 года на выбросы вредных веществ.

Необходимо отметить, что процессы, происходящие в камерах сгорания газотурбинных двигателей, протекают не отдельно, а взаимодействуя друг с другом. Поэтому для проведения вычислений, достаточно точно описывающих физику явлений, необходимо моделировать все физико-химические процессы, наблюдаемые в камерах сгорания. Для верификации имеющейся расчетной модели камеры сгорания ОАО «Авиадвигатель» заинтересовано в многофункциональном научном приборе, позволяющем бесконтактным способом исследовать динамические процессы горения и механизмы образования NO_x , CO , дыма непосредственно в камере сгорания ПД-14 (аэродинамическая структура химически реагирующих течений, температура и скорость потока, параметры фронта пламени, концентрация промежуточных и конечных продуктов горения, детализация кинетических механизмов химических процессов и т.д.).

3. Разработка технологии создания звукопоглощающих конструкций и высоконагруженных деталей из композиционных материалов на полимерной, металлической и керамической матрицах.

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все более широкое распространение в конструкции узлов авиационной техники. Так, например, в типовую серийную конструкцию пермских двигателей ПС-90А (для самолетов Ту-204/-214, Ил-96-300), ПС-90А-76 (для самолетов Ил-76ТД-90ВД, Ил-76МД-90), ПС-90А1 (для самолета Ил-96-400Т) введен ряд узлов из ПКМ, позволивших снизить их вес до 30 %, а главное, обеспечить выполнение ограничений по шуму на местности.

Несомненно, *промышленное внедрение композитов в конструкцию пермских моторов – крупная инновационная технология* и успех, в основе которого лежит опыт предприятий Пермского края, работающих в ракетно-космической и авиационных отраслях («Уральский НИИ композиционных материалов», ОАО «ПЗ «Машиностроитель», НПО «Искра» и ОАО «Пермский моторный завод»).

Однако номенклатура серийно эксплуатируемых узлов из ПКМ пока носит ограниченный характер. Это обусловлено недостаточным уровнем физико-механических характеристик используемых полимерных связующих. В основном узлы двигателя из ПКМ – это корпуса, кожуха и панели шумоглушения, т.е. узлы наружного контура, работающие при $T \leq 300^\circ\text{C}$.

Для самолетов и двигателей пятого поколения применение ПКМ является основной технологией, позволяющей кардинально снизить вес изделий, а значит, повысить топливную эффективность самолетов и увеличить полезную нагрузку. Поэтому обеспечение конкурентоспособности ПД-14 просто невозможно без широкого применения ПКМ в крупногабаритных узлах мотогондолы, реактивного сопла и реверсивного устройства, обшивке корпусов газогенератора. Таким образом, предусматривается довести массу узлов из композитов до 65 % от общей массы мотогондолы.

На рис. 16 показана планируемая область применения ПКМ в составе ПД-14.

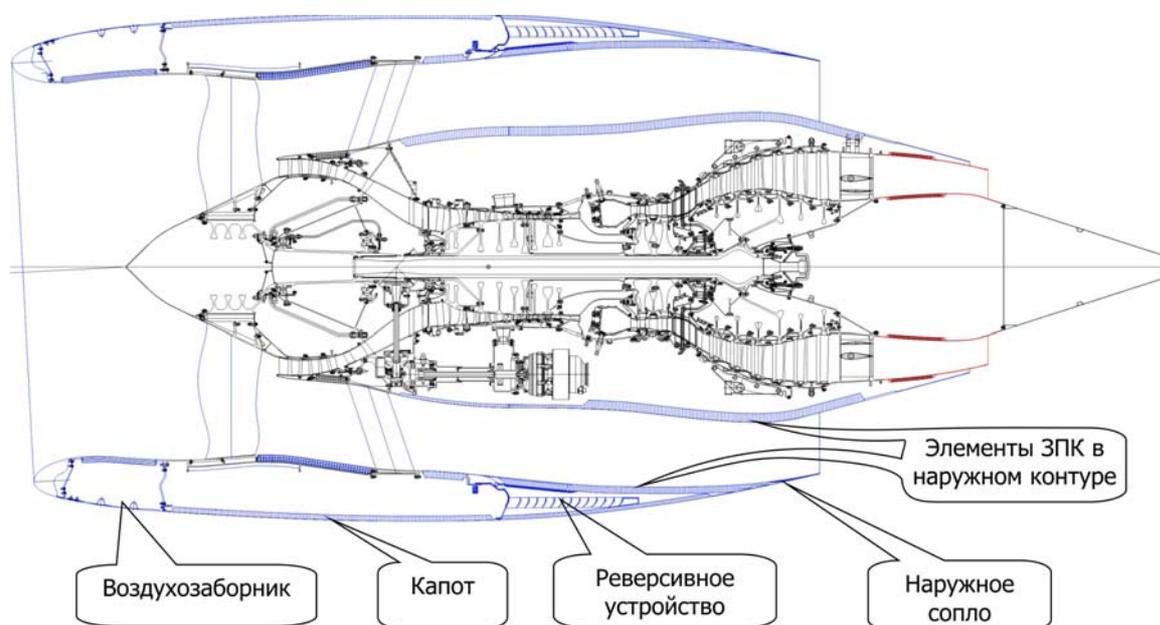


Рис. 16. Применение ПКМ в составе ПД-14

Дополнительно прорабатывается возможность изготовления из композитов вентиляторной лопатки и ряда элементов компрессора.

Одним из актуальных вопросов при проектировании высоконагруженных узлов авиационного двигателя из композиционных материалов является оценка прочности и ресурса создаваемых конструкций.

В настоящее время ОАО «Авиадвигатель» в сотрудничестве с ИМСС УрО РАН и ПГТУ проводит исследования, направленные на создание методик прогнозирования и экспериментального под-

тверждения статической прочности и циклического ресурса композитных конструкций. Методики основаны на математических моделях, учитывающих неоднородность и схему армирования конструкции, анизотропию свойств материалов слоев, накопление повреждений в слоях с частичной потерей механических свойств материала в процессе эксплуатации. Аналогичные модели [1, 2, 20] были предложены ранее для проверочной оценки прочности и ресурса первых вариантов композитных корпусных деталей серийно эксплуатируемого авиационного двигателя ПС-90А. Расчеты показали, что композитные корпусные детали обладают высокими запасами статической прочности и

достаточным ресурсом, что было подтверждено в процессе их эксплуатации в составе авиационных двигателей. Так, лидерная наработка ряда композитных деталей к настоящему времени превышает 7 400 часов.

Эффективность внедрения новых материалов связана с разработкой моделей механического поведения и развития методов расчета ответственных конструкций из композиционных материалов [4]. В 2008–2009 гг. на кафедре механики композиционных материалов и конструкций ПГТУ, возглавляемой профессором Ю.В. Соколкиным, под руководством

профессоров А.А. Ташкинова и А.Н. Аношкина были разработаны первые варианты методик оценки статической прочности и ресурса кожуха наружного задней подвески двигателя ПС-90А, изготовленного из стеклопластика ВПС-33. Расчеты показали, что наиболее нагруженными участками кожуха являются фланцевые узлы и места перегибов слоев. Разрушение в этих зонах начинается по типу расслоения. В целом, композитный кожух обладает достаточным запасом прочности – разрушение кожуха по типу расслоения начинается при наработке, значительно превышающей ожидаемое число циклов работы кожуха. Накопление расслоений композитного кожуха при циклическом нагружении в режиме «взлет-посадка» представлено на рис. 17.

В 2009 году в ИМСС УрО РАН под руководством профессора А.А. Адамова совместно с Центром экспериментальной механики Пермского государственного технического университета проведены первые экспериментальные исследования прочностных и деформационных характеристик натуральных образцов фланцев кожуха наружного задней подвески. В ходе работы определены диаграммы осевого растяжения образцов, а также поля перемещений. Для регистрации полей перемещений использовались современные цифровые оптические системы Strain Master и Vic-3D Limes. Применение оптических систем (рис. 18) позволило существенно повысить информативность испытаний для последующей верификации методики расчетов.

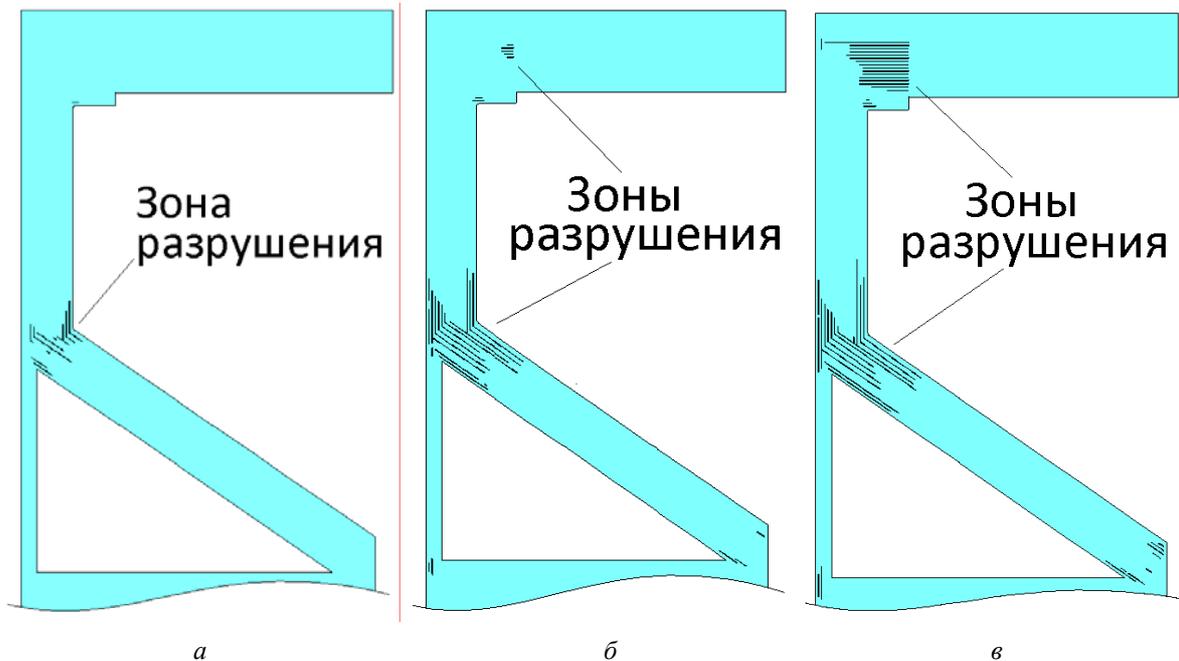


Рис. 17. Характер межслойных повреждений фланца кожуха при циклическом нагружении в режиме «взлет-посадка»: а – начальная, б – развитая, в – завершающая стадии разрушения

В настоящее время ставится задача экспериментального подтверждения результатов расчетных оценок, проведения испытаний образцов материалов, стандартных пакетов слоев и элементов конструкций. По результатам экспериментальных исследований необходима корректировка и создание общей методики расчетов прочности и ресурса работы всей номенклатуры узлов проектируемых композитных конструкций.

Центр экспериментальной механики ПГТУ, возглавляемый профессором В.Э. Вильдеманом, оснащен современными испытательными системами для исследования механического поведения материалов при сложном напряженном состоянии в широком диапазоне скоростей и температур внешних воздействий, что создает условия для эффективного решения фундаментальных и прикладных проблем прочности материалов и конструк-

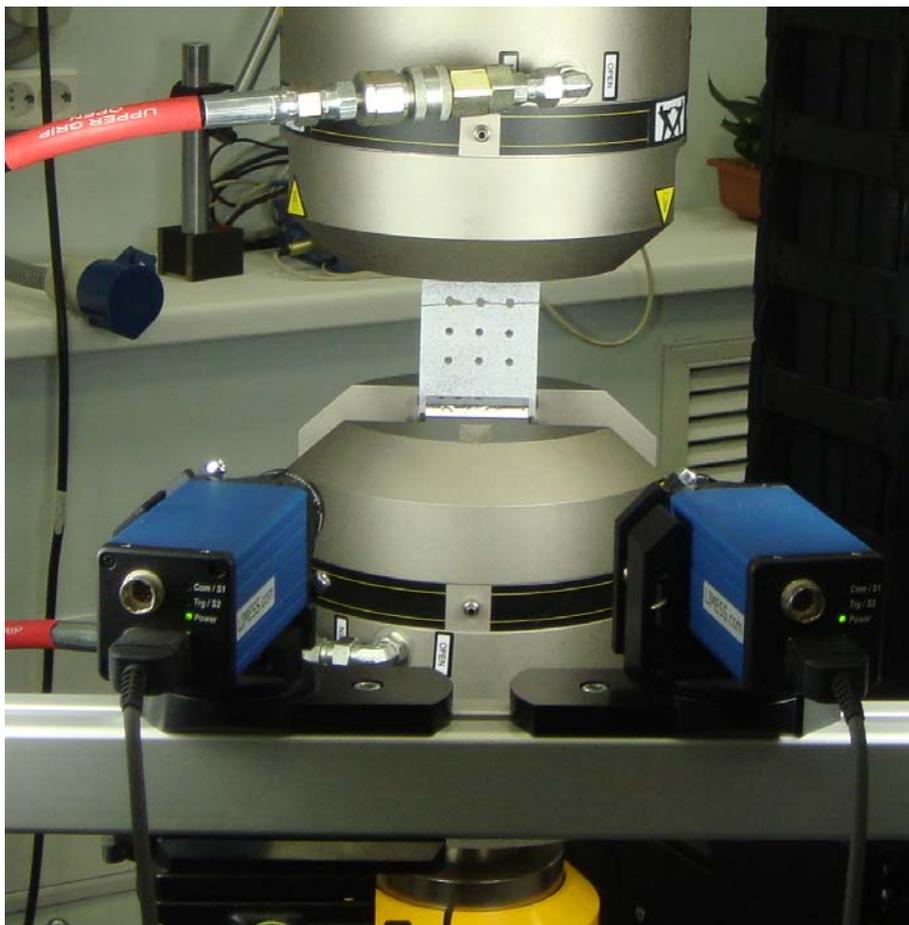


Рис. 18. Проведение механических испытаний с использованием оптической системы анализа деформаций в Центре экспериментальной механики ПГТУ

ций [3]. Специалисты Центра совместно с кафедрой «Авиационные двигатели» ПГТУ проводят экспериментальные исследования характеристик усталостной долговечности, малоциклового усталости и циклической трещиностойкости авиационных сплавов при переменных параметрах циклического нагружения в рамках реализации НИР Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

В настоящее время в ИМСС проводится отработка методики испытаний образцов из ПКМ с целью определения прочностных характеристик стеклопластиков и углепластиков. В Центре экспериментальной механики проходят испытания образцы панелей шумоглушения двигателя ПС-90А, которые также будут приме-

нены в авиационном двигателе ПС-90А2 для самолета Ту-204СМ (рис. 19).

Научно-технический и коммерческий успех программы создания семейства авиационных двигателей на базе ПД-14 для магистральных самолетов МС-21 во многом определяется тем, насколько эффективно и всесторонне будут реализованы самые передовые научные достижения и знания, прогрессивные конструкторские и производственные решения мирового уровня, новейшие информационные и вычислительные технологии. Инженеры и ученые Урала принимают активное участие в решении данных задач. Но наука не имеет границ, и мы внимательно рассмотрим все содержательные предложения, которые бы способствовали достижению заданной цели – войти в тройку лидеров авиационной индустрии.

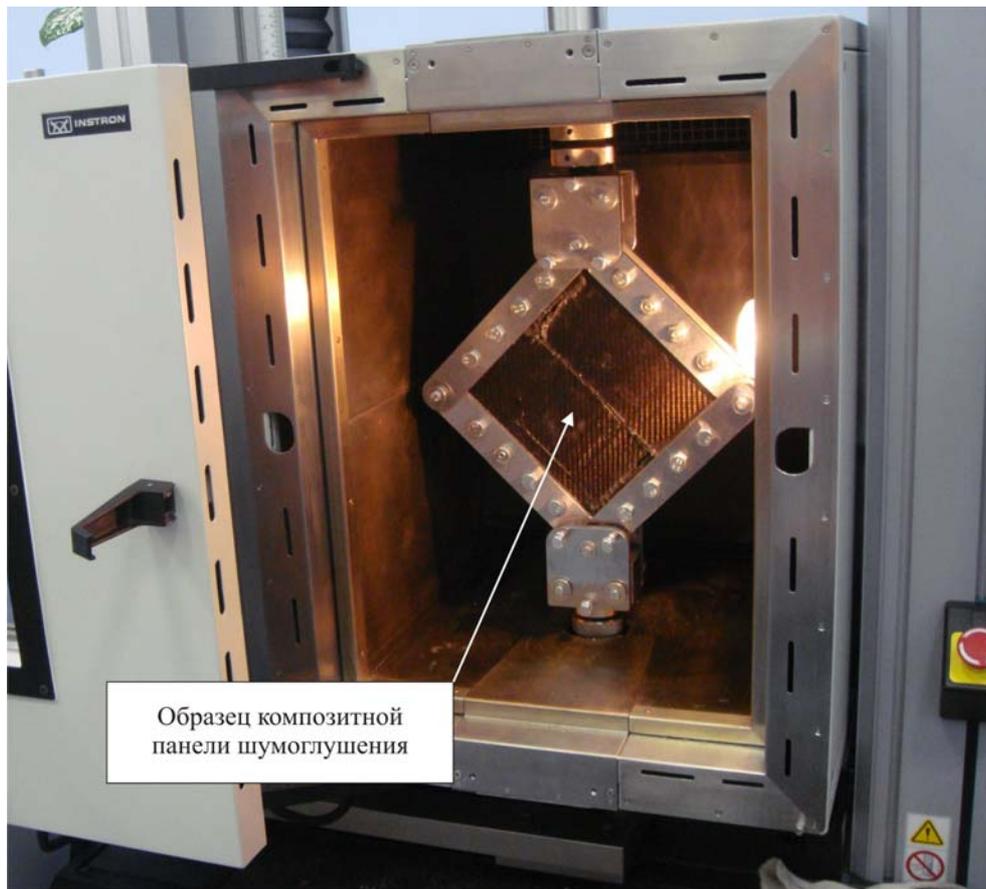


Рис. 19. Испытания композитных панелей на сдвиг в термокамере

Библиографический список

1. Аношкин А.Н., Ташинов А.А. Нестационарные процессы накопления повреждений композитных фланцев при циклических нагрузках // *Механика композитных материалов*. – 1997. – Т. 33. – № 5. – С. 636–643.
2. Аношкин А.Н., Ташинов А.А. Прогнозирование несущей способности композитных фланцев корпусных деталей авиадвигателей. – Пермь: ПГТУ, 1998. – 101 с.
3. Вильдеман В.Э., Санникова Т.В., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов при плоском напряженном состоянии // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2010. – № 5. – С. 106–111.
4. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. – М.: Наука, 1998. – 288 с.
5. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. – М.–Л.: изд-во АН СССР, 1947. – 147 с.
6. Измерение полей скорости и восстановление распределения частиц в двухфазном потоке мелкодисперсной среды на выходе из форсунки. / В.Г. Баталов, И.В. Колесниченко, А.Н. Полудницин, А.Н. Сухановский, П.Г. Фрик // *Материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации –2008»*. – Пермь, 2008. – С. 40–42.
7. Измерение спиральности турбулентных потоков методом PIV. / И.В. Колесниченко, А.Н. Полудницин, Р.А. Степанов, А.Н. Сухановский, П.Г. Фрик. // *Тр. десятой междунар. науч.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков»*. – М., 2009. – С. 114–117.
8. Иноземцев А.А., Бормалев С.В., Абрамчук В.Е. PLM-технологии в проектировании, производстве и совершенствовании газотурбинных двигателей // *Авиационная промышленность*. – 2009. – № 1. – С. 11–15.
9. Иноземцев А.А., Нихамкин М.Ш., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – Т. 2. – М.: Машиностроение, 2008. – С. 103–105.

10. Использование наноструктурных материалов и нанотехнологий для создания полых конструкций. / *О.Р. Валиахметов, Р.М. Галлеев, В.А. Иванько, А.А. Иноземцев, Р.М. Имаев, Н.Л. Кокшаров, А.А. Круглов, Р.Я. Лутфуллин, Р.Р. Мулюков, А.А. Назаров, Р.В. Сафиуллин, С.А. Харин.* // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т. 4. – № 11–12. – С. 56–65.
11. *Куценко Ю.Г.* Численные методы оценки эмиссионных характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей. – Екатеринбург–Пермь: УрО РАН, 2006. – 140 с.
12. Методика экспериментального модального анализа лопаток и рабочих колес газотурбинных двигателей. / *А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, А.Б. Сенкевич, А.Ю. Головкин, Б.П. Болотов* // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 11. – С. 2–6.
13. Нестационарные явления в турбомашинах / *В.Г. Августиневич, А.А. Иноземцев, Д.Б. Румянцев, А.М. Сипатов, Ю.Н. Шмотин.* – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 280 с.
14. Основы технологии создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов / под общ. ред. *А.Г. Братухина, Ю.Е. Решетникова, А.А. Иноземцева.* – М.: Авиатехинформ, 1999. – 554 с.
15. Перспективная технология изготовления полых широкохордной лопатки вентилятора. / *А.А. Иноземцев, Р.Р. Мулюков, Р.В. Сафиуллин, А.А. Круглов, Р.Я. Лутфуллин, Н.Л. Кокшаров, С.А. Харин, М.А. Морозов.* // Нанотехнологии и наноматериалы Пермского края: сб. статей / под общ. ред. *В.Н. Анциферова.* – Пермь: Пермский ЦНТИ, 2009. – С. 61–65.
16. *Плехов О.А., N. Saintier, Наймарк О.Б.* Экспериментальное исследование накопления и диссипации энергии при упруго-пластическом переходе // ЖТФ. – 2007. – Т. 77. – Вып. 9. – С. 1236–1238.
17. Собственные частоты и формы колебаний полых лопатки вентилятора ГТД. / *А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, И.Л. Гладкий, А.Ю. Головкин, Б.П. Болотов* // Авиационная промышленность. – 2010. – № 3. – С. 8–11.
18. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях. / *В.Г. Августиневич, Ю.Н. Шмотин, А.М. Сипатов, Д.Б. Румянцев, Д.Н. Ташлыков, Р.Ю. Старков, И.А. Пovyшеv, А.И. Полулях.* – М.: Машиностроение, 2005. – 536 с.
19. Экспериментальное исследование аномалий поглощения энергии в нанокрystаллическом титане при циклическом нагружении / *О. Плехов, О. Наймарк, Р. Валиев, И.Семенова, N. Saintier, T. Palin-Luc* // ПЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 13. – С. 33–40.
20. Эксплуатационный ресурс стеклопластикового кожуха сопла авиационного газотурбинного двигателя / *С.М. Рубцов, А.Н. Аношкин, А.А. Ташкинов, В.Е. Шавиуков.* // Конструкции из композиционных материалов. – 2007 – №3. – С. 11–17.