

например, по условиям крепления датчика или ограждения его от чрезмерно высоких температур, то уменьшают площадь S_{TP} и вновь определяют l_{TP} . При этом следует иметь в виду, что при слишком малых площадях S_{TP} и больших длинах l_{TP} сужается диапазон частот равномерного пропускания колебаний давления из-за повышения потерь энергии колебаний газа по длине канала. Сопротивление корректирующего дросселя, равное волновому сопротивлению канала, определяется по формуле $R_{др} = \sqrt{Z_0} R_c$. После окончательного выбора параметров зонда ($S_{TP}, l_{TP}, R_{др}$) необходимо провести контрольный расчет его амплитудно-частотной характеристики с учетом потерь энергии колебаний газа по длине канала и возможной податливости мембраны чувствительного элемента датчика давления.

Таким образом, разработана методика выбора параметров акустического зонда, при которых не вносится искажение в объект испытания выше допустимой нормы и в то же время обеспечивается измерение пульсаций давления с динамической погрешностью, не превышающей заданную величину.

Библиографический список

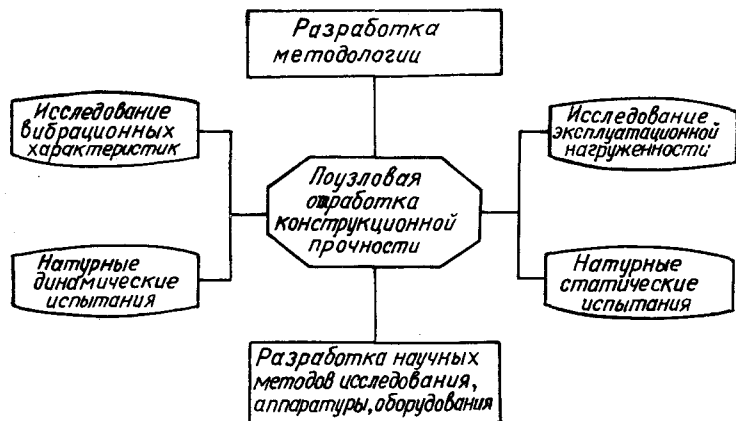
1. Сенин В.С. Определение динамических характеристик подсоединительных каналов преобразователей при измерении колебаний давления. - Измерительная техника, 1967, № 10, с.27-29.
2. Быстров Н.Д., Гимадиев А.Г. Коррекция акустических частотных характеристик газовых волноводов систем контроля и управления. - В кн. Гидравлика и пневматика. Приводы и системы управления. М.:Машиностроение, 1984, вып. 10, с.101-109.
3. Быстров Н.Д., Гимадиев А.Г., Шорин В.П. Об одной схеме выравнивания амплитудно-частотных характеристик акустических каналов систем измерения давления. - Известия вузов. Авиационная техника, 1981, № 3, с. 22-26.
4. Беляев Н.М., Белик Н.П., Уваров Е.И. Реактивные системы управления космических летательных аппаратов. - М.:Машиностроение, 1978. -232 с/

Д.С.Еленевский

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ПОУЗЛОВОЙ ДОВОДКИ ГТД
НА КОНСТРУКЦИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ

Обязательным условием достижения высоких показателей надежности современных двигателей является широкое применение при их создании принципа узловой отработки конструкционной прочности /1-3/.

В структуре узловой отработки прочности ГТД (рис.1) можно вы-



Р и с. 1. Структура узловой отработки конструкционной прочности ГТД

делять четыре основных направления. Первым является исследование эксплуатационной напряженности деталей и узлов, их вибрационного состояния, а также действующих силовых факторов на работающем двигателе. Ко второму относятся лабораторные исследования вибрационных характеристик элементов конструкций, потенциально предрасположенных к возникновению в них повышенных переменных напряжений. Третье предусматривает исследование и отработку динамической прочности деталей и узлов методами натурных динамических испытаний, в том числе при многофакторном циклическом нагружении, в условиях, приближенных к эксплуатационным. Четвертое заключается в исследовании и отработке прочности натур-

ных конструкций при действии статических и повторно-статических нагрузок на испытательных стендах с комбинированным силовым нагружением.

При исследовании эксплуатационной напряженности наиболее сложной задачей является надежное определение переменных напряжений в рабочих лопатках высокотемпературных турбин работающего двигателя. Эта задача решается применением лазерной микросварки элементов жаростойких тензорезисторов /4/ и внедрением методов плазменного и газоплазменного напыления изоляционного и защитного слоев из жаростойких окислов, что значительно повышает выносливость, адгезию и эрозионную стойкость тензорезисторов в условиях высоких температур и скоростей газа.

В связи с усложнением конструкций обострилась проблема исследования локальной статической напряженности горячих деталей при стендовых испытаниях. Для этой цели на базе специальных микротензопроволок из сплавов ОХ1406ФМ, Х20Н730М и НМ230Ф разрабатываются самокомпенсированные тензорезисторы с широким диапазоном значений температурной характеристики сопротивления, что позволяет сводить к приемлемому уровню погрешность измерения напряжений за счет влияния температуры при статическом тензометрировании одиночными тензорезисторами горячих узлов из всех основных жаропрочных и жаростойких материалов, применяемых в ГТД при температуре до 450°C, а в дальнейшем до 700°C. Вибрационные процессы в двигателе зачастую возникают и меняются по режимам испытаний и по времени наработки недетерминированно. Задача получения в этих условиях полных данных об уровне, характере и динамике этих процессов потребовала разработки и применения специальных автоматизированных измерительно-регистрирующих систем. Созданная для этой цели многоканальная автоматическая система виброконтроля при стендовых испытаниях двигателя /5/ постоянно следит за уровнем и характером всех компонентов вибрации и автоматически регистрирует по заданному алгоритму действующие вибропроцессы вместе с рабочими параметрами в случае возникновения экстремальных ситуаций по вибросостоянию. Система ведет также непрерывное накопление на магнитных лентах виброинформации за все время испытаний с помощью двух групп магнитографов, работающих попеременно. Обработка записей позволяет получать все необходимые характеристики вибросостояния двигателя и их динамику. Дальнейшее развитие таких систем будет идти по пути использования микропроцессорной техники для обеспечения первичной обработки вибропрочностной информации с выдачей результатов в эргономически удобной для потребителя форме непосредственно в темпе испытания двигателя.

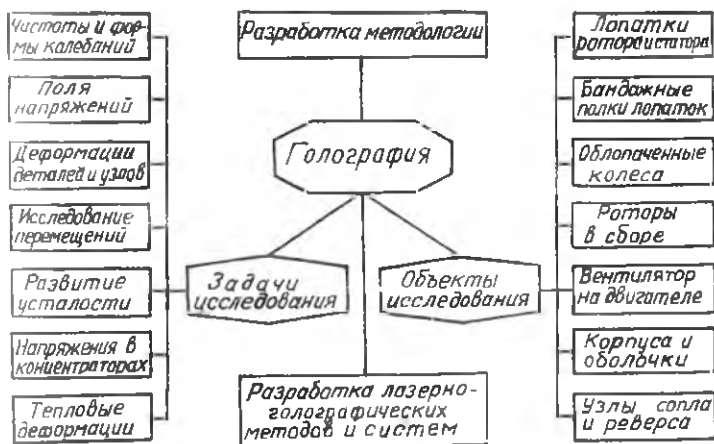
Проблема обработки возросшего объема высокоинформативных вибропрочностных параметров ГТД на уровне современных научных представлений в приемлемые для доводки сроки требует создания специализированных информационно-вычислительных центров (ИВЦ). Структура такого ИВЦ показана на рис.2. Он состоит из группы аналоговых анализаторов и устройств, процессора быстрого преобразования Фурье и собственно вычислительного комплекса, где в качестве центрального вычислителя используется ЭВМ СМ-2М с расширенной оперативной памятью до 128 К. В группе аналоговых устройств имеется подсистема предварительного отбора значимой информации по заданному критерию.

Аналоговые системы и процессор БПФ могут работать как автономно, так и совместно с ЭВМ, что дает возможность широкого выбора оптимального метода и средств анализа информации в зависимости от поставленной задачи.

Основной задачей дальнейшего развития таких специализированных ИВЦ является значительное увеличение объема памяти и быстродействия для обработки в реальном времени длительных реализаций многоканальных измерений высокочастотных процессов и для разработки математического обеспечения всех видов анализа.

В последнее время в обеспечении прочности и надежности ГТД все большую роль стала играть голография (рис.3) /6-8/. Для прочностных исследований используется способ голографической интерферометрии. Наибольшее применение этот способ находит при исследовании вибрационных характеристик деталей и узлов. Испытания ведутся, как правило, на установках типа СИН-1 с гелий-неоновыми лазерами непрерывного излучения ЛГ-3В. Подвергаются исследованию главным образом лопатки компрессора и турбины, а также шестерни, обложки, створки, колеса и другие детали малых и средних размеров. Для лопаток относительно простой формы разработан и применяется расчетно-экспериментальный метод определения относительной динамической напряженности кромочных элементов при различных формах колебаний на основе полученных с помощью метода стробоголографии виброинтерферограмм /9/.

Многие проблемы динамического и статического исследования деталей сложной формы с концентраторами напряжений могут быть решены путем применения метода спекл-голографии, который основывается на использовании эффекта интерференции спеклов, т.е. пятнистости лазерного излучения, отраженного от поверхности детали /10/. Этот метод позволяет определять максимально напряженные места детали, подробную картину распределения напряжений и их концентрацию. С помощью спекл-голографии оказалось возможным, например, получить тонкую структуру



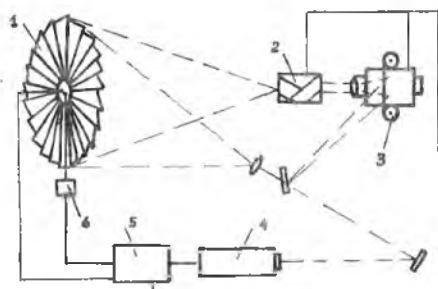
Р и с. 3. Применение голографии в прочностной доводке ГТД

распределения вибронпряжений вдоль выходной кромки натурной охлаждаемой лопатки турбины с окнами для выхода воздуха из внутренней полости. Обнаружена резкая локализация местных максимальных напряжений на границах окон и перемычек.

Промышленные голографические лазеры непрерывного излучения, с помощью которых реализуются изложенные выше методы, имеют малую мощность – максимум 5 мВт, что не позволяет исследовать крупные детали и узлы в целом. Одной из проблем является разработка ионного лазера принципиально новой конструкции мощностью в одномодовом режиме около 10 Вт. Он должен обеспечить голографические испытания конструкций диаметром до трех метров.

К органическим недостаткам голографических установок с лазерами непрерывного излучения можно отнести обязательное условие высокой степени виброизоляции, что вызывает большие ограничения и неудобства при испытании, а также невозможность исследования движущихся, вращающихся объектов. Эти недостатки могут быть преодолены с помощью импульсной голографии на базе двухимпульсных одномодовых твердотельных голографических лазеров. Голограмма в этом случае формируется двумя наносекундными импульсами равной энергии и одинакового спектра с микросекундным интервалом между ними.

Важной проблемой является создание на основе импульсной голографии перспективной киноголографической системы (рис.4) для бесконтактного исследования и контроля вибропрочностных параметров вентилятора на работающем двигателе /II/. Это особенно необходимо для двигателей с большой степенью двухконтурности. При создании такой



Р и с. 4. Принципиальная схема киноголографической системы для исследования вибрационного состояния вентилятора на работающем двигателе: 1 - вентилятор; 2 - деротатор изображения; 3 - киносъёмочный аппарат; 4 - двухимпульсный частотный лазер; 5 - блок управления и синхронизации; 6 - датчик

системы должен решаться комплекс сложных научно-технических задач. Наряду с созданием мощного двухимпульсного голографического лазера необходима разработка устройства деротации, которое оптически останаавливает изображение вращающегося вентилятора в интервале времени между двумя лазерными импульсами. Необходима также разработка специальных электронных систем синхронизации и управления.

систем регистрации особых реверсивных сред, которые фиксируют в реальном времени импульсную лазерную информацию определенной модальности. Проблемной задачей является также создание на базе оптоэлектроники и ЭВМ автоматизированной системы с соответствующим математическим обеспечением для определения полей векторов виброперемещений, а также динамического напряженно-деформированного состояния дисков и лопаток вентилятора на всех режимах работы двигателя по полученным голографическим интерферограммам.

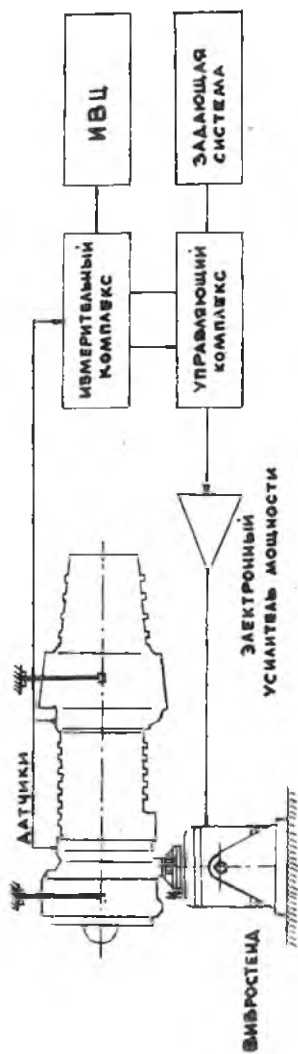
Обработка выносливости конструкций методами натурных усталостных испытаний является одним из основных направлений в поузловой доводке. Наряду с обычными испытаниями при симметричном цикле особое внимание уделяется комбинированным динамическим испытаниям конструкций с имитацией эксплуатационных статических нагрузок. Стенды для таких испытаний строятся на принципе агрегативности. Для каждого объекта создается своя конструкция установки с замкнутой схемой ста-

инического силового нагружения. Она монтируется на стандартном электро-динамическом вибраторе, с помощью которого у статически нагруженной детали возбуждается резонанс нужной формы колебаний. На таком принципе созданы и внедрены установки для комбинированных испытаний хвостовиков и замковых соединений лопаток компрессора и турбины, бандажных флангов, болтовых соединений и т.д. При испытании на усталость лопаток турбины в условиях высоких (до 1050°C) температур для контроля режимов нагружения и управления ими перспективным является широкое внедрение луча лазера. Это устраняет многие трудности проведения испытаний и значительно повышает их достоверность /12/.

Высокоэффективными являются натурные виброиспытания полноразмерных двигателей /13/. Для этого создаются мощные виброиспытательные комплексы, оснащенные автоматизированными системами управления, которые обеспечивают сложные программы виброн нагружения (рис.5). Этот метод позволяет находить потенциально слабые места конструкции и вести их опережающую вибропрочностную обработку.

Требование обработки динамической прочности конструкций при многокомпонентном программируемом нагружении вызвало необходимость автоматизации узловых усталостных испытаний. С этой целью создается специализированный управляющий комплекс на базе ЭВМ типа СМ-4 с соответствующим математическим обеспечением, который совместно с агрегатированным комплексом вибростендов образует единую информационно-испытательную систему (рис.6).

Важной задачей доводки является изучение и обработка прочности конструкций в условиях многофакторного нагружения. Это особенно важно для деталей ротора турбины, испытывающих одновременно температурное, силовое, термоциклическое и вибрационное воздействие. Новым методом обработки прочности рабочих лопаток высокотемпературных турбин в условиях сложного нагружения являются натурные испытания на разработанном в Институте проблем прочности АН УССР автоматизированном стенде термовибрационных испытаний /14/. Посредством индукционного нагрева в лопатке создается требуемое температурное поле, затем лопатка охлаждается внешним обдувом. Такое температурное циклирование осуществляется по требуемому закону. Параметры цикла выбираются близкими к эксплуатационным. Одновременно в лопатке возбуждаются резонансные колебания, и она подвергается программному виброн нагружению. Через охлаждаемую лопатку постоянно продувается воздух, что имитирует рабочее охлаждение. На стенде воспроизводятся эксплуатационные дефекты и обрабатываются мероприятия по их устранению. Стенд позволяет изучать прочность лопаток в условиях одновременного температурного и вибрационного циклирования.

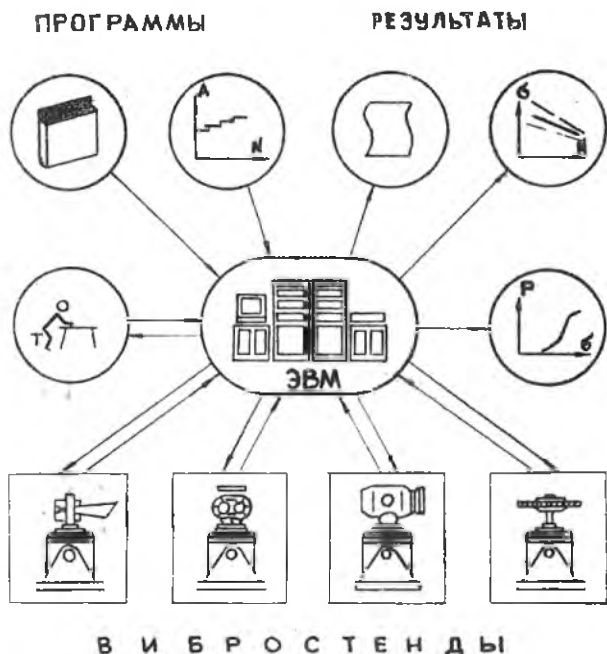


ВИДЫ ВИБРОНАГРУЖЕНИЯ

МОНОГАРМОНИЧЕСКОЕ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОЕ ПРОГРАММНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ НАГРУЗКИ

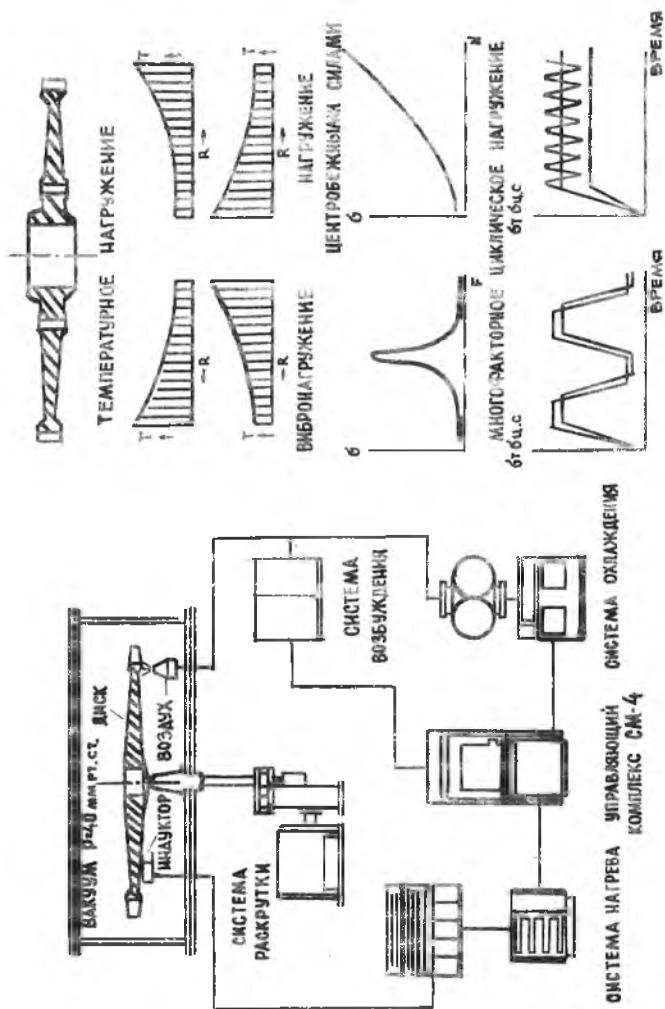


Р и с. 5. Система натуральных виброиспытаний полноразмерных двигателей



Р и с. 6. Система автоматизации поузловых усталостных и вибрационных испытаний

Для поузловой отработки несущей способности дисков и облопаченных колес в условиях циклического нагружения, имитирующего эксплуатационное, создается стенд многофакторных разгонно-термовиброциклических испытаний (рис.7). На стенде будут испытываться колеса диаметром до трех метров. Стенд имеет нагружающие системы раскрутки, нагрева-охлаждения и вибровозбуждения. Системы нагрева и охлаждения обеспечивают создание на дисках турбины температурных полей, соответствующих различным режимам работы двигателя, в том числе переменным: приемистости, уходу на малый газ, переключке режимов и т.д. При этом циклируются напряжения от центробежных сил, температурные напряжения за счет динамического изменения температурных полей, а также вибронапряжения путем возбуждения резонансных колебаний на соответствующих участках цикла.



Р и с. 7. Структура многофакторных разностно-термовиброциклических испытаний роторных конструкций

Таким образом, появляется возможность определять для натурального диска или облопаченного колеса все виды прочности: малоцикловую, кратковременную, длительную, усталостную в условиях реального многофакторного нагружения. Испытания будут полностью автоматизированы на базе двухуровневого управляющего вычислительного комплекса с центральной ЭВМ типа СМ-4. На стенде будут также исследоваться вибрационные характеристики лопаток с антивибрационными полками, а также сильно закрученных бесполочных и широкохордных лопаток крупноразмерных имитаторов непосредственно на облопаченных колесах в рабочем диапазоне оборотов. Это обеспечивается мощной системой динамического шумоумирования. Многофакторность нагружения при имитации эксплуатационных условий с широким варьированием действующих факторов позволит на этом стенде исследовать прочность натуральных роторных узлов, а также вести опережающую отработку несущей способности дисков и колес двигателей большого ресурса.

Комплексное решение изложенных в статье основных проблем развития методов поузловой доводки на прочность, а также сопутствующих им вопросов является одним из эффективных путей обеспечения высокой прочностной надежности двигателей нового поколения.

Необходимо отметить, что широкое внедрение на современном этапе создания ГТД методов поузловой доводки на прочность осуществляется при постоянном внимании и под непосредственным руководством академика Н.Д.Кузнецова.

Библиографический список

1. Кузнецов Н.Д. Некоторые проблемы современного газотурбостроения. - В сб.: Некоторые вопросы проектирования и доводки авиационных газотурбинных двигателей. Куйбышев:КуАИ, 1970, вып.45, с.5-16.
2. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. -М.:Машиностроение, 1976. - 213 с.
3. Еленевский Д.С. Поузловая отработка вибропрочности лопаток турбины ГТД. -В сб.:Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев:КуАИ, 1981, вып.8, с.29-41.
4. Еленевский Д.С., Рошин Ю.А., Кохановский В.Д. и др. Применение лазера для сварки выводов жаростойких тензорезисторов. Приборы и системы управления, 1976, № 3, с.48-49.
5. Липаев А.И., Егоров К.И., Еленевский Д.С. и др. Автоматическая система контроля, регистрации и анализа вибропроцессов. Проблемы прочности, 1976, № 5, с.74-77.

6. Еленевский Д.С., Бекбулатов Р.С., Шапошников Ю.Н. и др. Применение методов голографической интерферометрии в задачах экспериментальной доводки деталей газотурбинных двигателей. - В сб.: Новые разработки в области оптической голографии и их промышленное использование. Л.: ЛД НТП, 1979, с.78-81.
7. Голографические неразрушающие исследования: Сб. статей /Перевод с английского.- М.: Машиностроение, 1984. - 175 с.
8. Казачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. - М.: Машиностроение, 1979. - 443 с.
9. Еленевский Д.С., Бекбулатов Р.С., Шапошников Ю.Н. и др. Применение стробоголографического метода для исследования вибраций. - Проблемы прочности, 1976, № 5, с.95-99.
10. Еленевский Д.С., Бекбулатов Р.С., Шапошников Ю.Н. и др. Исследование динамических напряжений и деформаций деталей методом спекл-голографии. - В сб.: Оптическая голография и ее применение в промышленности. Л.: ЛД НТП, 1976, с.91-94.
11. Комар В.Г., Серов О.Б., Еленевский Д.С. и др. О системе голографического кинематографа, предназначенного для исследования и контроля интерференционным методом деформаций и напряжений вибрирующих и вращающихся изделий. - В сб.: Труды Всесоюзного научно-исследовательского кинофотоинститута. М., 1982, вып.110, с.5-13.
12. Еленевский Д.С., Бекбулатов Р.С., Ваданин А.П. и др. Система контроля режима виброиспытаний лопаток турбины и компрессора с использованием луча лазера. - Проблемы прочности, 1979, № 1, с.77-79.
13. Еленевский Д.С., Сипухин И.Г., Бекбулатов Р.С. и др. Комплекс натурных виброиспытаний двигателей летательных аппаратов. - Проблемы прочности, 1976, № 5, с.37-40.
14. Троценко В.Т., Еленевский Д.С., Цейтлин В.И. и др. Автоматизированная система исследования несудей способности рабочих лопаток ГТД в условиях программного силового и теплового нагружения. - В сб.: Научные основы и методы повышения надежности и долговечности газотурбинных двигателей. Киев: Наукова думка, 1979, с.140-149.