

С.А. Борзов, В.Н. Журавлев

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация: Исследованы современные методы обнаружения процесса вибрационного горения в узлах камер сгорания газотурбинных двигателей. Выполнен анализ «сильных» и «слабых» сторон каждой группы методов. Рассматриваются физические процессы виброгорения как в основных, так и в форсажных камерах сгорания. Приведены результаты экспериментальных замеров вибраций корпуса камеры сгорания.

Ключевые слова: камера сгорания, виброгорение, горение, пульсации давления, сертификационные испытания.

Введение. Постановка задачи. При проектировании и сертификации газотурбинных двигателей для гражданских и военных летательных аппаратов нормативной документацией [1] оговаривается необходимость проведения расчетно-экспериментальных работ по определению границ устойчивой работы камеры сгорания. Признаками стабильной работы камеры сгорания является работа без срывов пламени и вибрационного горения, которое можно характеризовать как неустойчивое горение, с изменяющимися во времени динамическими характеристиками давления.

Нормативной документацией [1] оговариваются:

- 1) схема препарировки основной и форсажной камеры сгорания (в случае ее применения);
- 2) измерительная аппаратура для проведения работ;
- 3) методы обработки результатов.

Данная методика проведения работ применяется в течение длительного периода времени и, в связи с развитием средств измерений и методов цифровой обработки сигналов, требует, на наш взгляд, - оптимизации и адаптации к существующему уровню техники и научно-техническому потенциалу научных организаций авиационной промышленности.

Основная часть. Для анализа методик нами выбраны следующие параметры:

1. Информативность и точность критериев обнаружения процесса вибрационного горения и определения его параметров;
2. Финансовые затраты необходимые для реализации всего комплекса работ;
3. Трудоемкость методик в процессе испытаний изделия.

Третий параметр является обобщающим, во многом перекликается с первыми двумя, но он дополняет их для получения объективного производственного результата оценки.

Виброгорение, возникающее при сжигании газообразных и жидких топлив является частным случаем процесса горения как такового. Горение это экзотермическая реакция между топливом и окислителем, в роли которого выступает кислород атмосферного воздуха. Высвобождение энергии в химической реакции наиболее существенная стадия такого процесса. Считается, что частота колебаний давления газа в основной камере сгорания (при наличии процесса вибрационного горения) принимает значение от 100 до 800 Гц. В форсажных камерах сгорания диапазон частот шире и составляет от 300 до 1200 Гц. Следует отметить тот факт, что колебания давления газа происходят во всех направлениях, как в окружном, так и в продольном, и могут наблюдаться как на установившихся, так и на переходных режимах работы системы двигатель-летательный аппарат. Важную роль в определении опасности последствий играют его параметры, такие как: частота пульсаций, амплитуда пульсаций, декремент затухания амплитуды, режим работы двигателя (переходной или стационарный). В большинстве случаев необходимо точно определить параметры работы двигателя, при которых может проявиться вибрационное горение.

Качественная оценка наличия виброгорения основана на анализе колебаний давления газа по всей длине камеры сгорания. Датчики избыточного давления [3] и дифференциально-индуктивные малогабаритные датчики [2] рекомендованы для проведения работ и имеют паспортную погрешность до 10% от величины максимально допустимого измеряемого давления. Для определения характеристик колебаний используется специальный программный комплекс с лицензионным программным обеспечением [4]. Следует отметить, что

для установки датчиков давления требуется выполнение дополнительных, трудоемких работ по конструкторско-технологическому проектированию и изготовлению препарированных (лабораторных) корпусов камер сгорания. Как правило, для дальнейшей эксплуатации препарированная материальная часть не допускается, в результате чего предприятие несёт существенные затраты. Часто (в гондоле двигателя) при испытаниях может возникнуть ситуация когда физически не достаточно места для размещения приборов препарировки дополнительно к уже имеющейся. Крупногабаритные двигатели не всегда можно испытать в термобарокамере и испытания в таких случаях проводятся на самолете летающей лаборатории, это может вызывать дополнительные трудности в проведении работ.

Если проанализировать современные методики обнаружения признаков процесса вибрационного горения, то можно выделить несколько основных направлений выполнения работ.

Во-первых, описанная выше классическая методика. Она имеет ряд преимуществ, главным из которых является то, что она проверена на большом количестве двигателей различной типовой конструкции. Благодаря этой методике обнаруживаются области нестабильной работы системы летательный аппарат-двигатель во всем диапазоне эксплуатационных характеристик летательного аппарата, которые впоследствии можно исключить из области выполнения полетных заданий и она также предоставляет возможность проверки эффективности найденных средств нейтрализации процесса виброгорения. Однако наравне с преимуществами, такая методика имеет и ряд недостатков:

1. Необходима доработка базового конструкторского профиля деталей и сборочных единиц узла камеры сгорания, что вызывает временные и финансовые издержки.

2. Необходимо наличие дополнительного сертифицированного программного обеспечения.

3. Необходима установка и привязка датчиков давления к горячим частям двигателя (обычно рабочая температура датчиков давления не должна превышать 80°C).

4. Необходима периодическая тарировка датчиков.

5. Погрешность измерения параметров пульсаций датчиками давления относительно высока.

6. При включении анализа пульсаций давлений в автоматическую систему управления двигателем (на постоянной основе) происходит ее усложнение.

Вторая группа может быть охарактеризована как бесконтактные методики. Метод [5] основан на регистрации света с помощью волоконной оптики т.е. световод передает энергию излучения на фотоэлектронный умножитель. Он является наиболее информативными и передовыми, поскольку одновременно с обнаружением виброгребня он позволяет визуализировать реагирующие потоки и количественно определять концентрации основных химических веществ. На режимах вибрационного горения частота колебаний излучения радикалов СН и С₂ (продукты сгорания углеводородных топлив) совпадает с частотой колебаний давления газа в камере сгорания. Для оценки бесконтактных методов можно сделать несколько следующих замечаний.

1. Необходима доработка базового конструкторского профиля деталей и сборочных единиц узла камеры сгорания, что вызывает временные и финансовые издержки.

2. Необходимо наличие дополнительного программного обеспечения.

3. Необходима установка и привязка датчиков к конфигурации обводов двигателя.

4. Необходима периодическая тарировка датчиков. Опыт работы нашего предприятия с оптическими регистраторами типа пирометров говорит о том, что с увеличением времени наработки, вследствие загрязнения оптических элементов датчиков продуктами сгорания топлива, их чувствительность значительно снижается и может достичь неприемлемой.

5. При включении анализа пульсаций давлений в автоматическую систему управления двигателем происходит ее усложнение.

6. Трудно обеспечить доступ луча света в разные зоны внутреннего объема жаровой трубы. Пока не выполнен набор статистических данных о зоне, генерирующей вибрационное горение,

необходимо производить замеры в каждой из трех зон жаровой трубы - в первичной вторичной и зоне разбавления.

Имеются патентные формулы по использованию методики, которая регистрирует изменение частот колебаний параметров газодинамического движения частиц в газе и определяет наличие или отсутствие вибрационного горения. При этом регистрацию изменения параметров газодинамического движения производят электростатическими антеннами без контакта с двигателем и его газодинамической струей, фиксируют временную реализацию сигнала колебаний электростатического поля, определяют спектральную плотность в спектре мощности временной реализации этого сигнала, сравнивают с эталонным значением спектральной плотности и в случае превышения определяемого параметра заданного эталонного значения, определяют частоту, на которой произошло превышение, сравнивают эту частоту со значениями частот вибрационного горения данной камеры сгорания и вырабатывают сигнал в систему контроля двигателя о наличии вибрационного горения [6]. К недостаткам такого метода регистрации следует отнести сложность обработки сигнала. Также вызывает вопросы эффективность переноса места замера процесса виброгорения с узла камеры сгорания в выходное сечение всего двигателя. В такой компоновке размещения датчиков трудно определить источник колебаний, и как следствие, затруднен подбор мероприятий по преодолению проявления признаков режима виброгорения.

В третьей группе методик используются датчики вибраций для определения наличия режима вибрационного горения на газотурбинном двигателе. Методика основана на регистрации вибрационных сигналов с последующей их обработкой методами узкополосные спектрального анализа [7,8]. Поскольку виброгорение есть колебательный процесс то возможно измерить вибрации корпуса камеры сгорания. Физическая модель данного метода основана на главном законе теории упругости – законе Гука. Этот закон связывает величину напряжения с величиной деформации упругой среды. В корпусе камеры сгорания при его деформации пульсациями давления газа возникает сила упругости, которая прямо пропорциональна величине этой деформации. Датчик вибраций как раз и фиксирует возникающие упругие деформации. При проведении

испытаний на двигателе Д-27 на стенде предприятия ГП «Ивченко-Прогресс» была проведена работа по измерению уровня вибраций корпуса камеры сгорания одновременно с замером пульсаций давления газа в полости камеры сгорания – результат работы представлен на рис. 1. Результаты исследований и обработки сигнала показали, что процесс виброгорения отсутствует. Такой результат подтверждается измерениями, проведенными ранее на летательном аппарате. Сигнал вибрационного датчика был обработан согласно методике представленной в [1]. Программное обеспечение разработано сотрудниками предприятия ГП «Ивченко-Прогресс».

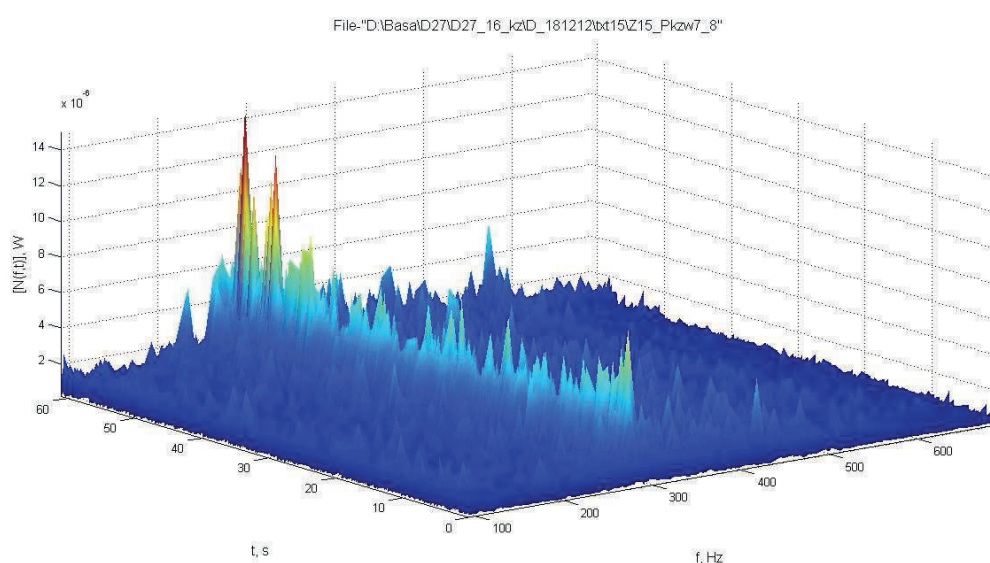


Рисунок 1 - Зависимость величины амплитуды колебаний от их частоты

В наземных газотурбинных двигателях проблема вибрационного горения решается более успешно [6] благодаря отсутствию жестких требований по габаритно-массовым характеристикам (практически не ограничивается количество и геометрические параметры устанавливаемых датчиков и их коммуникаций). С другой стороны, можно с определенностью сказать, что это произошло вследствие его частого обнаружения при их создании и эксплуатации. Появление процесса вибрационного горения в камерах сгорания наземных ГТД обусловлено особенностью их работы. К наземным двигателям применяются значительно более жесткие нормы ограничения эмиссий в выхлопных газах, что в свою очередь диктует работу узла камеры сгорания на предельно

обедненных топливно-воздушных смесях (для снижения температуры газов в первичной зоне жаровой трубы). Работа на «бедных» смесях, как широко известно, и служит «катализатором» вибрационного горения.

В настоящее время считается прогрессивным шагом обеспечение (на двигателях наземного применения) постоянного контроля величины пульсаций газа в узле камеры сгорания, что позволяет быстро и адекватно реагировать на возникновение вибрационного горения в двигателе во время его штатной работы [6]. За время длительной эксплуатации характеристики двигателя могут претерпеть изменения в сторону ухудшения (увеличиваются зазоры между ротором и статором, происходит частичный износ узлов подшипников, изменяются параметры топливных насосов и т.д.) и, как правило, увеличивается вероятность возникновения процесса вибрационного горения. Вследствие этих факторов и появились системы следящие за работой двигателя в режиме реального времени изначально интегрированные разработчиками двигателей в систему управления двигателем.

Результаты анализа сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Сравнение характеристики методик анализа процесса виброгорения

| Наименование методики | Замер пульсаций давления газа датчиками давления | Замер пульсаций давления газа бесконтактно | Замер пульсаций давления газа датчиками вибраций |
|-----------------------|--|---|---|
| Достоинства | 1) Успешно опробована на большом количестве различных двигателей. 2) признана сертификационными организациями | 1) Возможно измерение большого количества дополнительных параметров, таких как концентрации химических веществ 2) визуализация потоков | 1) Успешно опробована на достаточном количестве двигателей наземного применения. 2) не требует значительных финансовых затрат 3) низкая погрешность измерений |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Недостатки | 1) Требуются значительные временные и финансовые затраты 2) Сложность получения результатов в режиме реального времени 3) Высокая погрешность измерений | Требуются значительные временные и финансовые затраты | Не признана сертификационным и органами |
| Степень готовности промышленного применения | Максимальная | Минимальная | Максимальная |

Выводы. Для газотурбинных двигателей метод использования датчиков вибраций для определения наличия режима вибрационного горения имеет ряд преимуществ по сравнению с перечисленными выше. Соотношение между величиной затрат для его проведения и качеством получаемых результатов можно считать оптимальным.

1. Никаких доработок стандартной (серийной) материальной части не требуется. Датчик устанавливается на любой болт – шпильку с помощью волновода длиной 100...300 мм.

2. Вибродатчик устанавливается на волноводе и имеет невысокую рабочую температуру, что увеличивает срок его службы. При обнаружении области с высокой температурой в подкапотном пространстве двигателя, можно увеличить длину волновода и переместить датчик в зону с более низкой температурой.

3. Не требуется постоянная тарировка датчика.

4. Погрешность измерения на порядок ниже.

Поскольку на данный момент времени применяется несколько методов обнаружения процесса вибрационного горения при работе двигателя - это подтверждает серьезное отношение к этой проблеме у ведущих фирм [5,6,7] производителей и разработчиков газотурбинных двигателей. Также с определенностью можно сказать и о том, что попытки оптимизировать решение данной проблемы не прекращаются до сих пор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авиационные правила часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. Международный авиационный комитет. с. 82.
2. Датчики давления индуктивные дифференциальные малогабаритные ТУ-ДМИ-67.
3. Датчики давления МИДА 13П и взрывозащищенные МИДА-13П-Ех ТУ 4345-044-18004487-98.
4. Прибор для измерения, регистрации и анализа параметров вибрационных процессов. Руководство по эксплуатации с. 37 НПП "Мера" Россия г. Королев. Режим доступа <http://www.nppmera.ru/documentation>
5. Экспериментальная обработка методов исследования вибрационного горения в камерах сгорания ГТУ. А.Н. Дубовицкий, С.В. Иванова ФГУП «ЦИАМ им. Баранова» г. Москва. Режим доступа: http://www.avid.ru/upload/pages/5914/sbornik_137-138.pdf
6. Способ контроля вибрационного горения в камере сгорания газотурбинного двигателя. Голенцов Д. А., Божков А. И. Заявка: 2004125512/06, 23.08.2004 Федеральное государственное унитарное предприятие "ЦИАМ им. П.И. Баранова". Режим доступа <http://bd.patent.su/2272000-2272999/pat/servlet/servletcf8e.html>
7. Потерянский Л.И. Исследование вибрационного состояния газотурбинной установки SIMENS V64.3A на пусковых режимах и под нагрузкой при опытно-промышленной эксплуатации. Потерянский Л.И, Потерянский С.Л ЗАО «Кварц – Западная Сибирь». Режим доступа http://www.nppmera.ru/assets/files/vibro-expert_example.pdf
8. Беляев В.В. Повышение экологической безопасности путем организации малоэмиссионного горения в камерах сгорания ГТД. Самарский научно-технический комплекс имени Н.Д Кузнецова. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Режим доступа <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-ekologicheskoi-bezopasnosti-gtu-putem-organizatsii-maloemissionnogo-goreniya-v-ka>