

УДК 621.45.022.5

И. Ф. КРАВЧЕНКО¹, В. Н. ЖУРАВЛЕВ¹, С. А. БОРЗОВ¹, А. В. ПАПЧЁНКОВ²¹ ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс»² ПАО "Мотор Сич", Запорожье, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

Анализируются параметры, характеризующие качество турбулентности пламён основной камеры сгорания газотурбинного двигателя (ГТД). Показано, что параметр спектрального объема сигнала турбулентного горения чувствителен к мощности сигнала пульсаций турбулентной скорости на интервале времени активности пламени в объеме жаровой трубы и параметрам вибрационного горения в диапазоне вероятных частот. Изменение качества работы камеры сгорания по результатам оценки предложенных параметров позволит увеличить её энергетическую и ресурсную эффективность и, как следствие, увеличится ресурс двигателя в целом.

Ключевые слова: камера сгорания, турбулентное горение, вибрационное горение, параметры турбулентности пламён.

Введение. Постановка задачи

В связи с тем, что основным и единственным источником энергии газотурбинного двигателя (ГТД) является узел камеры сгорания, энергетическая и ресурсная эффективность двигателя определяется качеством процесса горения топлив и параметрами турбулентности рабочего тела в объеме жаровой трубы. Различают режимы ламинарного, турбулентного и детонационного горения топлив. Два крайних режима допускают возникновение как кратковременного, так и длительного процесса вибрационного горения [1], как малой, так и большой интенсивности, которая характеризуется совпадением собственных частот элементов конструкции двигателя с частотными параметрами турбулентных вихрей, возникающих в процессе горения. Проведенные многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [2, 3] доказывают, что наиболее эффективным, с точки зрения полноты сгорания топлива и токсичности продуктов сгорания, является режим турбулентного горения. Косвенными параметрами, характеризующими эффективность режима, являются температура пламени и количество эмиссии окислов азота NO_x , причём при уменьшении этих параметров пламени имеют предрасположенность к возникновению режима вибрационного горения [4]. Ввиду большой добротности контуров механического резонанса, процесс диссипации в них энергии пульсаций турбулентных вихрей приводит к резкому снижению ресурса тягело нагруженных элементов двигателя.

В результатах ранее проведённых исследований предложены феноменологические параметры

турбулентности потока рабочего тела в камере сгорания. Однако технологическая трудоёмкость их определения в составе двигателя и адаптация к конструктивным особенностям узла камеры сгорания не позволяют осуществлять оперативный прогноз и управление режимом горения.

Научно-техническая задача повышения эффективности и достоверности определения одномерного параметра режима качества турбулентного горения, с учётом границ перехода работы камеры сгорания в вибрационный режим, актуальна как с теоретической точки зрения, так и с прикладной, в части разработки опережающего научно-технического задела создания перспективных ГТД.

1. Основная часть. Теоретические исследования

Проведен анализ эволюции однопараметрических коэффициентов, поясняющих интенсивность и линейный масштаб турбулентности в пламенах камеры сгорания. Следует отметить, что не все исследования достаточно хорошо согласуются между собой из-за сложности их проведения, различия методик измерений и точности измерительных приборов [5].

Первый вклад в изучение интенсивности турбулентных пламён сделан известным немецким химиком Дамкёлером [2]. Им было предложено, что турбулентное пламя имеет ту же структуру, что и ламинарное, и связать наблюдаемое увеличение скорости горения с вызываемым турбулентностью искривлением фронта пламени, что увеличивает площадь поверхности горения по сравнению с гладким ламинарным фронтом и, следовательно, спо-

способность «перерабатывать» свежую смесь. Автором предложено охарактеризовать скорость распространения турбулентного пламени при крупномасштабной турбулентности следующим выражением

$$S_T = S_L + u', [\text{м/с}], \quad (1)$$

где S_T – скорость распространения турбулентного потока, S_L – скорость распространения ламинарного потока, u' – среднее квадратическое значение пульсаций скорости. Параметр турбулентности (1) имеет размерность скорости и не позволяет пояснить масштаб, т.е. часть энергии турбулентности в суммарной энергии потока рабочего тела, в связи с этим не нашел применения в процессах технологической доводки двигателей.

В дальнейшем появился ряд теорий, исследующих концепцию искривленного фронта пламени и отличающихся от теории Дамкёлера (и одна от другой) способом увязывания характеристик турбулентности с результирующим увеличением поверхности пламени. Так, в подходе, развитом Щёлкиным [5], выражение для параметра скорости U_T турбулентного определяется выражением

$$U_T = U_N \cdot \sqrt{1 + \frac{u' \cdot l}{\chi}}, [\text{м/с}], \quad (2)$$

где u' – средняя скорость турбулентных пульсаций [м/с], l – масштаб турбулентности [м], χ – температуропроводность [м²/с]. Анализ показывает, что данный подход имеет недостатки, свойственные предыдущему, однако, учитывает линейный масштаб турбулентности l , который должен соответствовать размеру жаровой трубы и коэффициент температуропроводности χ , который, по мнению авторов, отражает скорость перемещения энергии. Отличия от предыдущих подходов существенно повышают энергетическую информативность параметра (2), однако, не поясняет границы перехода к вибрационному процессу горения.

Наибольшее применение в научных и технических исследованиях нашел безразмерный параметр Кармана [6], который определяется отношением среднего квадратичного пульсационных составляющих компонент скорости потока рабочего тела u' к осреднённой на определённом интервале времени T скорости его течения \bar{U} :

$$Ka = \frac{u'(t)}{\bar{U}(t)}, \quad (3)$$

$$T \in [t].$$

Анализ коэффициента (3) показывает его информативность в части масштаба скоростей, однако, не отражает параметр линейного масштаба энергии

турбулентности l и не несёт информации о признаках вибрационного горения.

Как видно из анализа (1 – 3), пульсационная составляющая турбулентной скорости горения $u'(t)$ неизменно участвует во всех выражениях для определения параметра турбулентности, но существующие подходы не позволяют адекватно отвечать на возникающие вопросы о качестве процесса горения.

Промежуточные выводы. Проведя анализ традиционных одномерных параметров турбулентности пламен можно сделать вывод, что все они не учитывают два очень важных, по нашему мнению, параметра: энергетическую эффективность турбулентности и чувствительность к границе возникновения вибрационного горения. Математическая модель j -ого параметра турбулентности K_{ω_j}

определяется выражением:

$$K_{\omega_j} = \left\{ \begin{array}{l} 10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^k \omega_i^2 S_i(\omega_i, t)}{k} \right] \\ S_i(\omega_i, t) \geq aM[S(\omega, t)] \end{array} \right\}, [\text{dB}] \quad (4)$$

$$S(\omega, t) = \int_0^T R_{xx}[u'(t)] e^{-j\omega t} dt,$$

$$\omega \in [\Delta\Omega], T \in [t],$$

где $M[S(\omega, t)]$ – математическое ожидание спектральной плотности мощности $S(\omega, t)$ сигнала $u'(t)$ в полосе частот $\Delta\Omega$; $R_{xx}[u'(t)]$ – автокорреляционная функция сигнала $u'(t)$; $a = 0,1$ – коэффициент чувствительности модели; T – интервал времени анализа; j – количество значений рассчитываемой функции; $k = \frac{\Delta\Omega}{\Delta\omega}$ – количество интервалов частот

$\Delta\omega$ в частотном диапазоне $\Delta\Omega$; $\Delta\omega = \frac{Fs}{T}$, Fs – частота дискретизации сигнала $u'(t)$. Предложенный параметр (4) чувствителен к мощности (энергии) сигнала пульсаций турбулентной скорости $u'(t)$ на интервале времени T и параметрам вибрационного горения в полосе частот $\Delta\Omega$. Параметр является аналогом понятия объема канала, который традиционно [7] применяется в теории информации.

2. Результаты экспериментальных исследований

Результаты, обсуждаемые в данной статье, получены на основании научно-исследовательских

работ, выполненных на испытательных стендах ГП «Ивченко-Прогресс» и ПАО «Мотор Сич», Украина, г. Запорожье. В настоящее время на ГП «Ивченко-Прогресс» разрабатывается и проходит практическую апробацию методика по подтверждению возможности обнаружения процесса вибрационного горения в ГТД [8] с помощью пьезоэлектрических акселерометров [9].

При исследованиях параметра спектрального объема сигнала турбулентного горения датчик (акселерометр) установлен возле рабочей форсунки камеры сгорания (рис. 1).

Проведен расчет спектральной плотности мощности (СПМ) сигналов в широкой полосе частот. Анализ функции СПМ показал наличие «следов» роторных вибраций вала свободной турбины $f = (650 - 750)\text{Hz}$ и вала турбокомпрессора $f = (850 - 950)\text{Hz}$. Исключив эти диапазоны частот, рассчитаны (рис. 2, 3) функции параметра Кармана (3) (рис. 2) и спектрального параметра турбулентности (4) (рис. 4). Анализ графиков позволяет утверждать, что предлагаемый параметр более информативен, чем традиционный параметр Кармана.

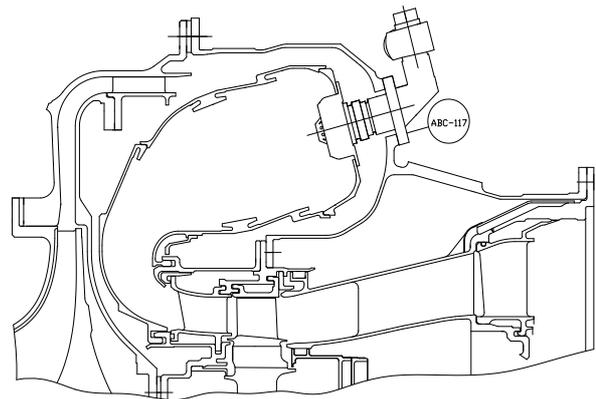


Рис. 1. Схема установки датчиков

Для проверки чувствительности исследуемого параметра к началу процесса вибрационного горения, предположим, что сигнал роторной частоты турбокомпрессора, в частотном диапазоне $f = (850 - 950)\text{Hz}$, является началом режима вибрационного горения. Функции исследуемых параметров для этого режима приведены на рисунках 4 и 5.

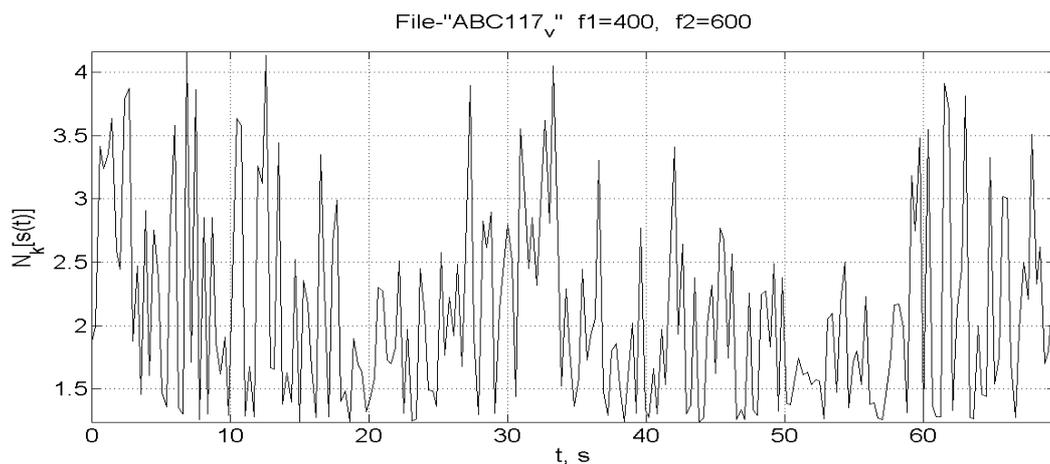


Рис. 2. График функции параметра Кармана в частотном диапазоне $f = (400 - 600)\text{Hz}$

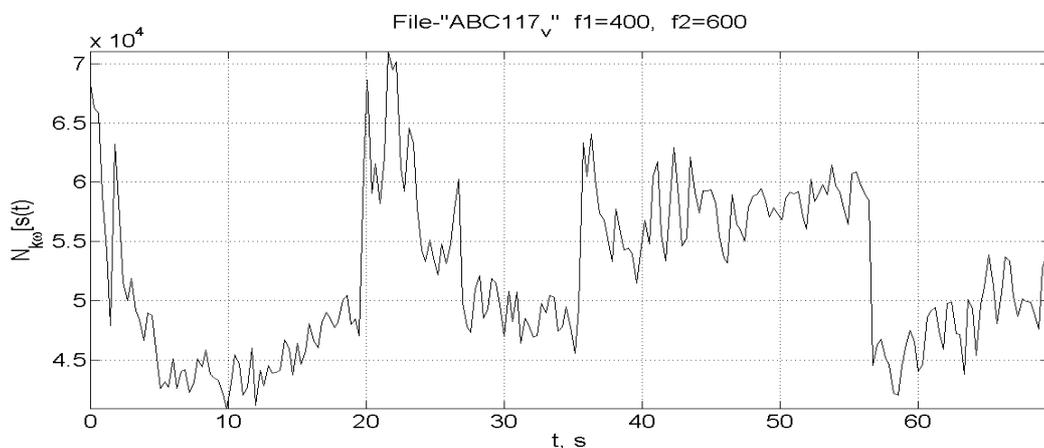
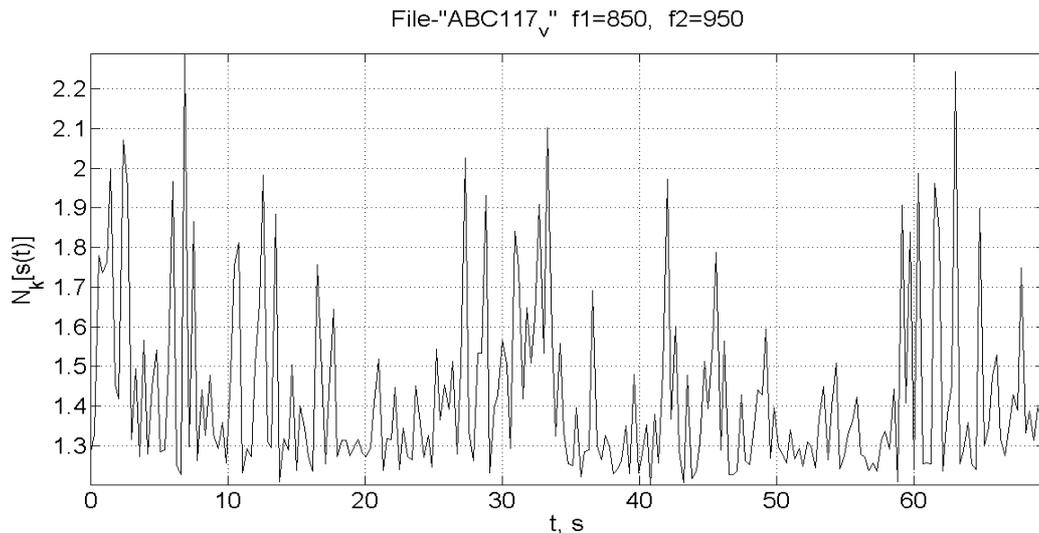
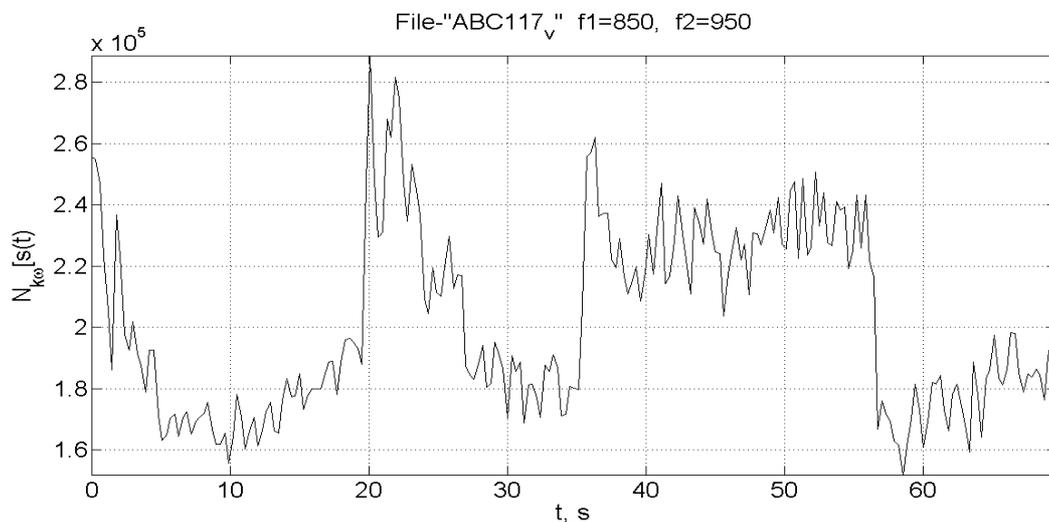


Рис. 3. График функции спектрального параметра турбулентности в частотном диапазоне $f = (400 - 600)\text{Hz}$

Рис. 4. График функции параметра Кармана в частотном диапазоне $f = (850 - 950)\text{Hz}$ Рис. 5. График функции спектрального параметра турбулентности в частотном диапазоне $f = (850 - 950)\text{Hz}$

Анализ функции спектрального параметра турбулентности показывает увеличение динамического диапазона на 0,5 дБ по сравнению с режимами, не содержащими признаков вибрационного горения.

Анализ результатов исследований позволяет сделать следующие промежуточные выводы:

- параметр Кармана слабо чувствителен к параметру пульсаций турбулентного горения, который отчетливо наблюдается на левых нижних функциях СПМ;

- предложенный спектральный параметр турбулентности адекватно отображает турбулентные процессы на интервалах времени (20 – 25) с. и (40 – 55) с., и чувствителен к началу режима вибрационного горения.

3. Общие выводы

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Для «тонкой» доводки узла камеры сгорания газотурбинных двигателей необходимо более полное определение количества выделенной энергии при однозначной взаимосвязи с частотным диапазоном и временем работы двигателя. Исследованные параметры объема сигнала турбулентного горения и информационного расстояния в симметричных точках кольцевой камеры сгорания определяют это взаимодействие.

2. Изменение качества работы камеры сгорания по результатам оценки предложенных параметров позволит увеличить её энергетическую и ресурсную эффективность и, как следствие, увеличится ресурс двигателя в целом.

Литература

1. Раушенбах, Б. В. Вибрационное горение [Текст] / Б. В. Раушенбах. – М. : Физ. мат. лит., 1961. – 500 с.
2. Лефевр, А. Процессы в камерах ГТД [Текст] : пер с англ. / А. Лефевр. – М. : Мир, 1986. – 566 с.
3. Пчелкин, Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей [Текст] / Ю. М. Пчелкин. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
4. Open-loop active control of combustion dynamics on gas turbine engine [Text] / Geo. A. Richards, Jimmy D. Thornton, Edward H. Robey, Leonell Arellano // Journal of engineering for gas turbines and power. – 2007. – Vol. 129. – January.
5. Щелкин К. И. - Быстрое горение и спиновая детонация газов. [Текст] / К. И. Щелкин / под. ред. академика Н. Н. Семенова. – М. : Воениздат, 1949. – 196 с.
6. Hall, Carl W. Laws and Models: Science, Engineering and Technology [Электронный ресурс] /

Carl, W. Hall. – CRC Press, Boca Raton, 2000, – 524 p. – Режим доступа: <http://books.google.ru/books?id=EEhpsf6L09gC&lpg=PA241&dq=karman%20number&pg=PA241#v=onepage&q=karman%20number&f=false>. – 1.06.2014.

7. Кузьмин, И. В. Основы теории информации и кодирования [Текст] / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. – К. : Вища шк., 1986. – 238 с.

8. Кравченко, И. Ф. Исследование влияния параметров пульсаций давления в камере сгорания на устойчивость работы ГТД [Текст] / И. Ф. Кравченко, В. Н. Журавлев, С. А. Борзов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2013. – № 8 (105). – С. 136–141.

9. Частотная модель коэффициента турбулентности пламени камеры сгорания ГТД [Текст] / В. Н. Журавлев, С. А. Борзов, А. В. Папченко, В. С. Кабак // Системні технології : зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Нац. метал. акад. – Вып. 3(92). – Дніпропетровськ, 2013. – С. 13-18.

Поступила в редакцію 01.06.2014, рассмотрена на редколлегии 14.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Украины, проф. каф. авиационных двигателей М. М. Митрахович, Национальный авиационный университет, Киев.

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД

І. Ф. Кравченко, В. М. Журавльов, С. А. Борзов, О. В. Папченко

Аналізуються параметри, що характеризують якість турбулентності полум'їв основної камери згоряння ГТД. Параметр спектрального об'єму сигналу турбулентного горіння чутливий до потужності сигналу пульсацій турбулентної швидкості на інтервалі часу активності полум'я в об'ємі жарової труби й параметрам вібраційного горіння в діапазоні ймовірних частот. Зміна якості роботи камери згоряння по результатам оцінки запропонованого параметра дозволить збільшити її енергетичну й ресурсну ефективність та, як наслідок, збільшити ресурс двигуна у цілому.

Ключові слова: камера згоряння, турбулентне горіння, вібраційне горіння, параметри турбулентності полум'їв.

MATHEMATICAL MODELS OF ENERGETIC EFFECTIVENESS FOR COMBUSTION CHAMBER UNIT OF GAS TURBINE ENGINE

I. F. Kravchenko, V. N. Zhuravlev, S. A. Borzov, A. V. Papchonkov

Parameters which define quality of turbulent flames of main combustion chamber unit of gas turbine engines are analyzing. It is shown the parameter of spectral volume of signal of turbulent combustion has sensitiveness to the power of oscillation turbulent velocity within time interval of flame activity and vibration combustion parameters in the range of the frequencies probability. The combustor chamber quality work changes according to results of estimation offered parameters and allow to increase energy and lifetime effectiveness of the one and in consequence increase lifetime whole engine will happen.

Key words: combustion chamber, turbulent combustion, combustion oscillation, parameters of turbulent flame

Кравченко Игорь Федорович – канд. техн. наук, Генеральный конструктор, ГП «Ивченко-Прогресс» Запорожье, Украина, e-mail: root@ivchenko-progress.com.

Журавлев Владимир Николаевич – д-р техн. наук, зам. нач. Управления информационных технологий, ГП «Ивченко-Прогресс» Запорожье, Украина, e-mail: ws50@i.ua.

Борзов Сергей Анатольевич – вед. констр. отдела камер сгорания, руководитель группы жаровых труб, ГП «Ивченко-Прогресс» Запорожье, Украина, e-mail: kpr345@i.ua.

Папченко Александр Викторович – зам. технического директора по новым изделиям, ПАО «Мотор Сич» Запорожье, Украина, e-mail: parchonkov@gmail.com.