

В.Н. Журавлев, С.А. Борзов, А.В. Попчѐнков, В.С. Кабак

**ЧАСТОТНАЯ МОДЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА  
ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЛАМЕНИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД**

*Анотація. Запропонована і експериментально досліджена частотна модель сигналу турбулентного горіння, яка визначає енергію турбулентного потоку в камері згорання. Модель чутлива до параметра потужності сигналу пульсацій турбулентної швидкості на інтервалі часу активності полум'я в об'ємі жарової труби і параметрів вібраційного горіння в діапазоні вірогідних частот.*

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [1 – 3] доказывают, что наиболее эффективным, с точки зрения энергетической эффективности сгорания топлива и токсичности продуктов сгорания, является режим турбулентного горения. Косвенными параметрами, характеризующими эффективность режима, являются температура пламени и количество эмиссии окислов азота  $NO_x$ , причѐм, при уменьшении этих параметров пламени имеют предрасположенность к режиму вибрационного горения [4]. Предложены феноменологические параметры турбулентности потока рабочего тела камер сгорания. Однако технологическая трудоѐмкость их определения в составе двигателя и адаптация к конструктивным особенностям узла камеры сгорания не позволяют осуществлять оперативный прогноз эффективности управление режимом горения в режиме реального времени.

Научно-техническая задача разработки и исследования математических моделей, чувствительных к параметру энергетического качества режима турбулентного горения, с учѐтом границ перехода 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.** Первый вклад в изучение *интенсивности* турбулентных пламен был сделан известным немецким химиком Дамкѐлером [2]. Он предположил, что тур-

булентное пламя имеет ту же структуру, что и ламинарное и связал наблюдаемое увеличение скорости горения с вызываемым турбулентностью искривлением фронта пламени, что увеличивает площадь поверхности горения по сравнению с гладким ламинарным фронтом и, следовательно, способность «перерабатывать» свежую смесь. Автор предложил характеризовать скорость распространения турбулентного пламени при крупномасштабной турбулентности следующим выражением  $S_T = S_L + u'$ , [м/с], где  $S_T$  – скорость распространения турбулентного потока,  $S_L$  – распространения ламинарного потока,  $u'$  – среднеквадратическое 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 он 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) главным образом способом увязывания характеристик турбулентности с результирующим увеличением поверхности пламени. Так, в подходе, развитом Щёлкиным [5], выражение для параметра скорости  $U_T$  турбулентного определяется выражением:

$$U_T = U_N \cdot \sqrt{1 + \frac{u' \cdot l}{\chi}}, \text{ [м/с]}, \text{ где } u' \text{ – средняя скорость турбулентных}$$

пульсаций [м/с],  $l$  – масштаб турбулентности [м],  $\chi$  – температуропроводность [м<sup>2</sup>/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  $\chi$ , который, по мнению автора, отражает скорость перемещения энергии. Отличия от предыдущих подходов существенно повышают энергетическую информативность параметра (2), однако он 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  $\bar{U}$ :

$$Ka(t) = \frac{u'(t)}{\overline{U(t)}}, \quad (1)$$

$$T \in [t]$$

Анализ параметра (1) показывает его информативность в части масштаба скоростей, однако он не отражает параметр линейного масштаба энергии турбулентности  $l$  и не несёт информации о признаках вибрационного горения. Следует отметить, что не все исследования достаточно хорошо согласуются между собой из-за сложности их проведения, различия методик измерений и точности измерительных приборов [5].

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. Проведя анализ традиционных одномерных параметров турбулентности пламён можно сделать вывод, что все они слабо чувствительны к двум очень важным, по нашему мнению, параметрам: энергетической эффективности турбулентности и границе начала вибрационного горения.

В процессе решения поставленной задачи предложена и апробирована математическая модель  $j$ -ого параметра турбулентности  $K_{t\omega}$ , которая определяется выражением:

$$K_{t\omega_j} = 10 \lg \left[ \frac{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_i(\omega_i, t)}{S_0(\omega, t)} \right], [dB]$$

$$S_i(\omega_i, t) \geq a \{ \max[S(\omega, t)] \}, \quad (2)$$

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

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

где:  $\max[S(\omega, t)]$  – максимальное значение спектральной плотности мощности  $S(\omega, t)$  сигнала  $u'(t)$  в полосе частот  $\Delta\Omega$  при  $t = T$ ;  $S_0(\omega, t) = 1W / Hz$  – константа пороговой спектральной плотности мощности сигнала  $u'(t)$ ;  $R_{xx}[u'(t)]$  – автокорреляционная функция сигнала

$u'(t)$ ;  $a = 0,1$  – коэффициент чувствительности модели (динамический диапазон  $20dB$ );  $T$  – интервал времени анализа;  $k = \frac{\Delta\Omega}{\Delta\omega}$  – количество интервалов частот  $\Delta\omega = 1Hz$  в частотном диапазоне  $\Delta\Omega$ .

Предложенный параметр (2) чувствителен к спектральной плотности 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 получены в процессе выполнения научно-исследовательских работ на испытательных стендах ГП «Ивченко-Прогресс» и АО «Мотор Сич», Украина г. Запорожье. В настоящее время на ГП «Ивченко-Прогресс» разрабатывается и проходит практическую апробацию методика обнаружения процесса вибрационного горения в камере сгорания ГТД с помощью пьезоэлектрического акселерометра [8], который устанавливается возле рабочей форсунки камеры сгорания.

Был проведён расчет спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала  $u'(t)$  датчика вибраций в широкой полосе частот (100 – 1500) Гц (рис. 1).

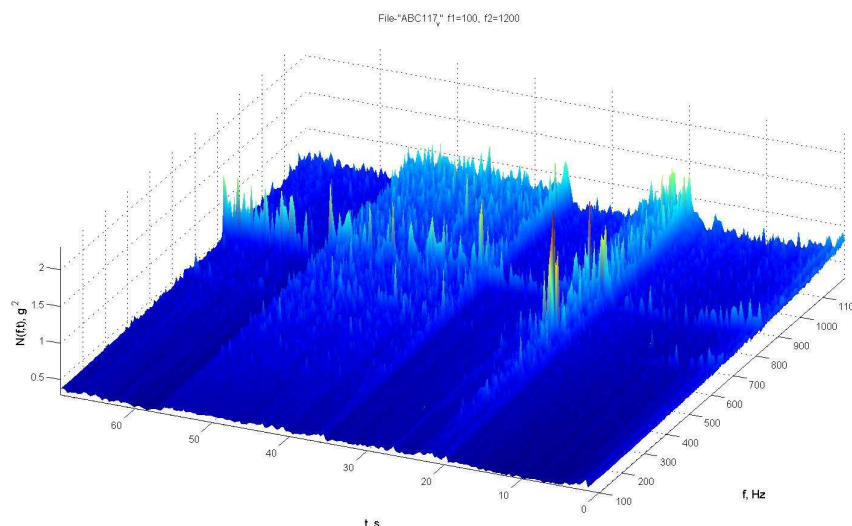


Рисунок 1 - Функция СПМ сигнала датчика вибраций

Анализ функции СПМ показывает наличие «следов» роторных вибраций вала свободной турбины  $f = 640Hz$  и вала турбокомпрессора

$f \approx 830\text{Hz}$ . Исключив эти диапазоны частот, были рассчитаны (рис. 2) функции параметра Кармана (1) и спектрального параметра турбулентности (2).

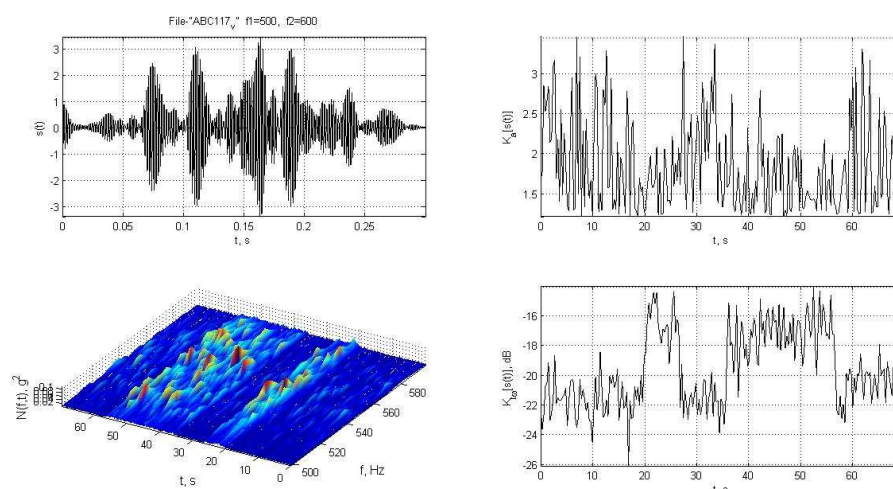


Рисунок 2 - Графики функций в частотном диапазоне  $f = (500 - 600)\text{Hz}$

На рисунке приведены: левый верхний – анализируемый сигнал  $u'(t)$ , после полосовой фильтрации фильтром Баттерворта второго порядка и обработки Гауссовым окном для устранения эффекта Гиббса; левый нижний – СПМ  $S(\omega, t)$  анализируемого сигнала; правый верхний – функция параметра Кармана  $Ka(t)$ ; правый нижний – функция спектрального параметра турбулентности  $K_{t\omega}(t)$ .

**3 Анализ результатов. Выводы.** Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- функция спектрального параметра турбулентности в анализируемом частотном диапазоне показывает, что она имеет иной характер огибающей (с учетом изменения режима двигателя на (15 - 20)с. ) по сравнению с частотными диапазонами, не содержащими признаков вибрационного горения;
- параметр Кармана (1) слабо чувствителен к параметру пульсаций турбулентного горения, который отчетливо наблюдается на функциях СПМ;
- предложенный спектральный параметр турбулентности (4) адекватно отображает турбулентные процессы на интервалах времени (20 - 25) с. и (40 - 55) с.

Для «тонкой» доводки узла камеры сгорания ГТД необходимо более полное определение выделенной энергии при однозначной взаимосвязи с частотным диапазоном турбулентных процессов и режимом работы двигателя. Исследованный спектральный параметр сигнала турбулентного горения однозначно определяет вышеозначенное взаимодействие.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение [Текст] / Б.В. Раушенбах – М.: Гос. изд-во физ. мат. лит., 1961. – 500 с.
2. Лефевр А. Процессы в камерах ГТД. [Текст] / Пер с англ. 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. Geo. A. Richards, Jimmy D. Thornton, Edward H. Robey, Leonell Arellano. [Текст] / Journal of engineering for gas turbines and power. Vol. 129 January 2007.
5. Щелкин К. И. - Быстрое горение и спиновая детонация газов. [Текст]/ Под. ред. Академика Н.Н. Семенова. – М.: Военное издательство министерства вооруженных сил Союза ССР. 1949. – 196 с.
6. Carl W. Hall Laws and Models: Science, Engineering and Technology. [Электронный ресурс]  
<http://books.google.ru/books?id=EEhpsf6L09gC&lpg=PA241&dq=kaman%20number&pg=PA241#v=onepage&q=karman%20number&f=false> /CRC Press, Boca Raton, 2000, 524 p.
7. Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования [Текст] / И.В. Кузьмин, В.А. Кедрус. – К.: Вища школа, 1986. – 238 с.
8. Кравченко И.Ф., Журавлев В.Н., Борзов С.А. Исследование влияния параметров пульсаций давления в камере сгорания на устойчивость работы ГТД. [Текст] / Авиационно-космическая техника и технология №8 (105) стр. 136-141