

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ НАЗЕМНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

© 2021

Д. В. Скиба кандидат технических наук, заместитель научного руководителя;
ООО «НПФ «Теплофизика», г. Уфа;
d.skiba@teplophysics.ru

Д. А. Максимов кандидат технических наук, первый заместитель директора;
ООО «НПФ «Теплофизика», г. Уфа;
teplophysics@mail.ru

Р. С. Кашапов кандидат технических наук, директор;
ООО «НПФ «Теплофизика», г. Уфа;
teplophysics@mail.ru

Т. С. Харисов ведущий инженер по техническому развитию;
ООО «НПФ «Теплофизика», г. Уфа;
аспирант;
Уфимский государственный авиационный технический университет;
kharisov_ts@mail.ru

Рассмотрены проблемы, возникающие при разработке малоэмиссионных камер сгорания с предварительным смешением топлива для газотурбинных установок наземного применения, связанные с возникновением пульсаций давления в камерах сгорания, а также со способами их регистрации и измерения. На сегодняшний день отсутствует единый метод оценки и расчёта амплитудно-частотных характеристик таких пульсаций и их измерения в целом. Статья подготовлена на основе многолетнего опыта измерения и регистрации пульсаций давления в условиях опытного стенда и эксплуатации. Приводятся методы оценки и накопления результатов измерений, выработаны критерии определения средней частоты и амплитуды колебаний, воспроизводимые в ходе экспериментов и при измерениях в натуральных условиях. Для выявления вибрационного горения также используется дополнительный критерий когерентности колебаний с помощью энтропийного коэффициента. Результаты расчётно-экспериментального исследования показывают, что пульсационное давление в объёме камеры сгорания не позволяет использовать зонды измерения пульсаций давления в воздушном объёме камеры сгорания для надёжного предотвращения возникновения вибрационного горения в ходе её эксплуатации.

Малоэмиссионная камера сгорания; предварительное смешение топлива; виброгорение; измерение пульсаций давления

Цитирование: Скиба Д.В., Максимов Д.А., Кашапов Р.С., Харисов Т.С. Особенности контроля пульсаций давления в камерах сгорания наземных газотурбинных установок // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 4. С. 40-51. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-40-51

Мировым трендом совершенствования экологических показателей стационарных газотурбинных установок (ГТУ) является применение малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС) на базе технологии DLE (Dry Low Emission), отличающихся особыми требованиями к регулированию рабочего процесса в них. Главным образом это связано с тем, что процесс горения смеси с предварительным смешением топлива в зависимости от режимных параметров на входе в камеру сгорания (КС) склонен к переходу в автоколебательный режим. Система автоматического управления (САУ) ГТУ должна отслеживать изменение режимных параметров ГТУ и обеспечивать устойчивость горения.

Программные средства САУ ГТУ должны быть разработаны с учётом закономерностей возникновения пульсаций давления в зависимости от режимных параметров ра-

боты МЭКС, которые могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от нагрузки и окружающей среды. Кроме того, в процессе длительной эксплуатации возможно изменение линии рабочих режимов ГТУ, обусловленных износом узлов. Трудности в оценке влияния этих факторов предопределяет необходимость систем контроля пульсаций давления в составе САУ ГТУ. Большинство современных ГТУ с МЭКС зарубежного производства оснащено подобными системами.

Наиболее подробно освещённой в литературе является система контроля пульсаций давления фирмы IMI Sensors [1]. Однако данная система также имеет ряд недостатков, связанных с использованием пьезоэлектрических датчиков пульсаций давления. Основной недостаток применения таких датчиков обусловлен тем, что датчики чувствительны к вибрационным ускорениям. Место размещения датчиков на корпусе газотурбинного двигателя, на большом расстоянии от оси вращения, приводит к воздействию на них высоких виброускорений конструкции. Кроме того, эти датчики не позволяют измерять постоянную составляющую давления, что делает затруднительным контроль исправности датчиков пульсаций давления в процессе работы ГТУ. Отстройку от вибраций корпуса газотурбинного двигателя (ГТД) в данных системах осуществляют двумя способами: либо использованием двух датчиков пульсаций давления, выращенных на одном кристалле, либо размещением датчика пульсаций давления на большом расстоянии от корпуса ГТД (размещение по схеме Remote sensor). Кроме того, для отстройки от собственных частот зондов пульсаций давления применяется технология «бесконечно длинного» отборника (“Infinite” Coil), однако у такой технологии есть своя отрицательная особенность: в процессе эксплуатации, особенно при останове ГТУ, происходит конденсация паров воды в «бесконечно длинном» отборнике, что требует создавать системы продувки зондов и слива конденсата.

В связи с описанными недостатками этой системы измерения НПФ «Теплофизика» на протяжении более чем двадцати лет разрабатывала собственную систему измерения пульсаций давления в малоэмиссионных камерах сгорания. В основу этой системы измерения были положены пьезорезистивные датчики пульсаций давления, отличающиеся двумя основными преимуществами по сравнению с пьезоэлектрическими датчиками пульсаций давления:

- 1) отсутствием влияния вибраций корпуса на показания пьезорезистивных датчиков давления (в частности, их исправность невозможно проверить ударом по корпусу системы измерения пульсаций давления);
- 2) возможностью измерения статического давления, что позволяет при измерении данным типом датчика перепада давления сравнить его среднее измеренное значение с расчётным значением перепада на стенке жаровой трубы.

Первоначальная схема зонда измерения пульсаций давления представлена на рис. 1. Из-за узкого температурного диапазона пьезорезистивного датчика в конструкции зонда было предусмотрено использование водяного охлаждения. Данная система использовалась при проведении пусконаладочных работ, однако система принудительного охлаждения не позволяла обеспечить требуемый уровень надёжности.

На рис. 2 представлена система измерения пульсаций давления в камере сгорания газоперекачивающего агрегата (ГПА) ГТК-25ИР. В данной системе измерения пульсаций давления, аналогично системам IMI Sensors, датчики пульсаций давления расположены на большом расстоянии от корпуса ГТД, что позволяет снизить их температуру в ходе эксплуатации. Максимальная наработка системы измерения пульсаций давления в составе ГПА составляет более 15 тыс. часов.

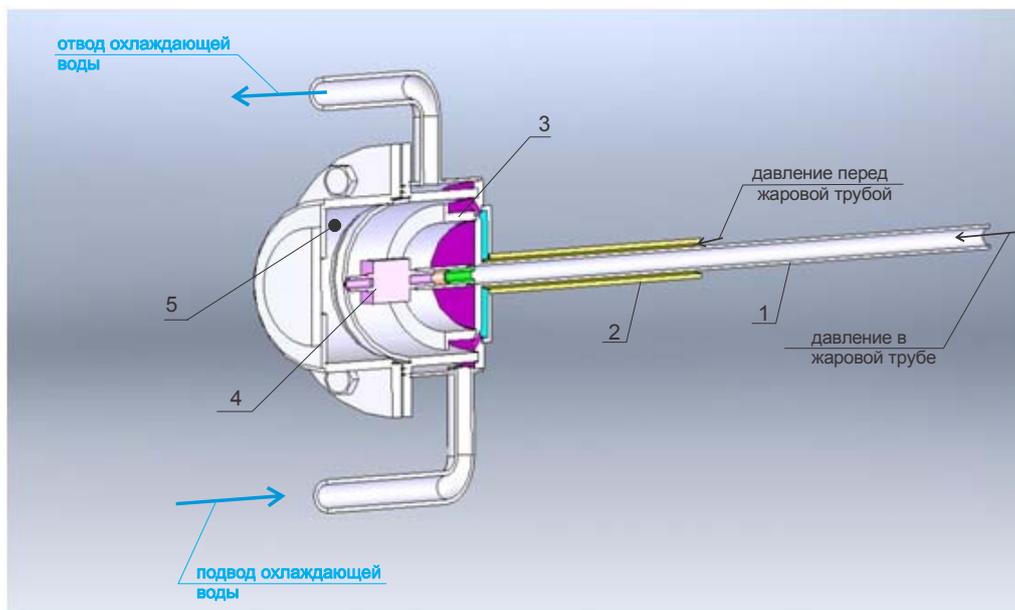


Рис. 1. Схема зонда измерения пульсаций давления:
 1 – зонд отбора давления в жаровой трубе; 2 – зонд отбора давления перед жаровой трубой;
 3 – накопитель конденсата; 4 – датчик давления; 5 – компенсационный объем

При эксплуатации данной системы измерения пульсаций давления выявилась проблема конденсации паров воды на датчике пульсаций давления. Частично эта проблема была решена использованием зонда без использования технологии «бесконечно длинного» отборника и обеспечения сброса конденсированной воды под действием силы тяжести. Вместо использования корректирующих элементов в такой системе измерения пульсаций давления используется зависимость амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) зонда от температуры и давления на входе в камеру сгорания, расчётной температуры в зоне горения. Окончательно эта проблема была решена использованием датчиков Keller PD-23, в которых осуществлена полная герметизация между каналами отбора давления и электронным оборудованием.

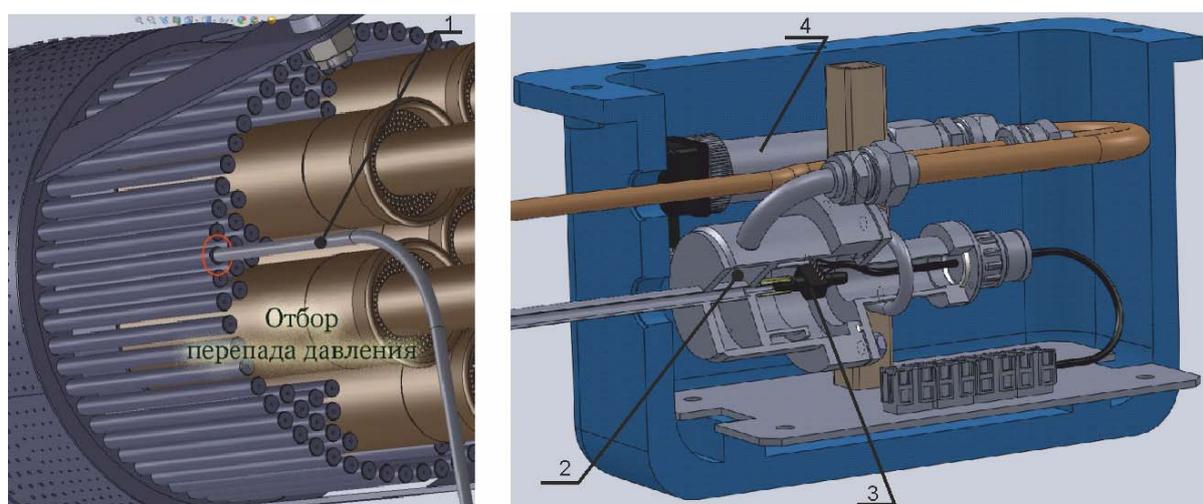


Рис. 2. Система измерения пульсаций давления в камере сгорания ГТК-25ИР:
 1 – зонд пульсаций давления; 2 – компенсационный объем; 3 – дифференциальный датчик давления
 (измерение пульсаций давления и перепада давления на стенке жаровой трубы);
 4 – датчик избыточного давления на входе в камеру сгорания

Для определения АЧХ может использоваться аналитическое решение из [2]:

$$\Pi(\omega) = \left(\cosh \left(\omega \frac{L}{a_0} \Gamma(\omega) \right) \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$\text{где } \Gamma(\omega) = \sqrt{\frac{k J_0(i^{3/2} S_2(\omega))}{n J_2(i^{3/2} S_2(\omega))}}, \quad \eta = \left(1 + \frac{k-1}{k} \frac{J_2(i^{3/2} S_1(\omega))}{J_0(i^{3/2} S_1(\omega))} \right)^{-1}, \quad S_1(\omega) = \sqrt{\omega \frac{L}{a_0} k \text{Pr} K},$$

$$S_2(\omega) = \sqrt{\omega \frac{L}{a_0} k K}, \quad K = \frac{P_0 R^2}{\mu a_0 L}.$$

В формулах использованы обозначения: i – мнимая единица; R – радиус канала зонда; k – показатель адиабаты; Pr – число Прандтля; ω – круговая частота колебаний; μ – динамическая вязкость; a_0 – скорость звука без учёта воздействия колебаний; P_0 – среднее абсолютное давление в зонде; L – длина зонда; J_0, J_2 – бесселевы функции; $\Pi(\omega)$ – передаточная функция между пульсациями давления в камере сгорания и показаниями датчика пульсаций давления на конце зонда. Данная формула верна при $K < 40$ и частоте колебаний $\frac{\omega_0 L}{a_0} < 4\pi$. $1/K$ – носит название коэффициента демпфи-

рования возмущений. Использование формулы (1) требует большого времени для вычисления одного значения АЧХ, что делает её плохо применимой для использования в системе управления камерой сгорания.

Существует упрощённая формула расчёта АЧХ зонда, впервые предложенная Кирхгофом [2]:

$$\Pi(\omega) = \frac{2\varepsilon \text{Exp} \left(-i \frac{\omega L}{a_0} \right)}{1 + \varepsilon^2 \text{Exp} \left(-i \frac{2\omega L}{a_0} \right)}, \quad \varepsilon = \text{Exp} \left(-\sqrt{\frac{\omega \mu}{2\rho R^2}} \left(1 + \frac{k-1}{\sqrt{\text{Pr}}} \right) \frac{L}{a_0} \right). \quad (2)$$

Данное выражение существенно проще выражения (1), что позволяет производить расчёты в реальном масштабе времени при проведении измерений.

Было проведено экспериментальное исследование применимости соотношения (2) для обработки результатов измерения пульсаций давления в камере сгорания с использованием пьезорезистивных датчиков. Для экспериментального исследования представленных соотношений был спроектирован стенд измерения передаточной функции $\Pi(\omega)$. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 3.

Основная идея экспериментального стенда заключается в создании пульсаций давления за счёт переменного расхода из измерительной полости. Переменный расход создается изменением проходного сечения на выходе из полости за счёт вращения диска с отверстиями.

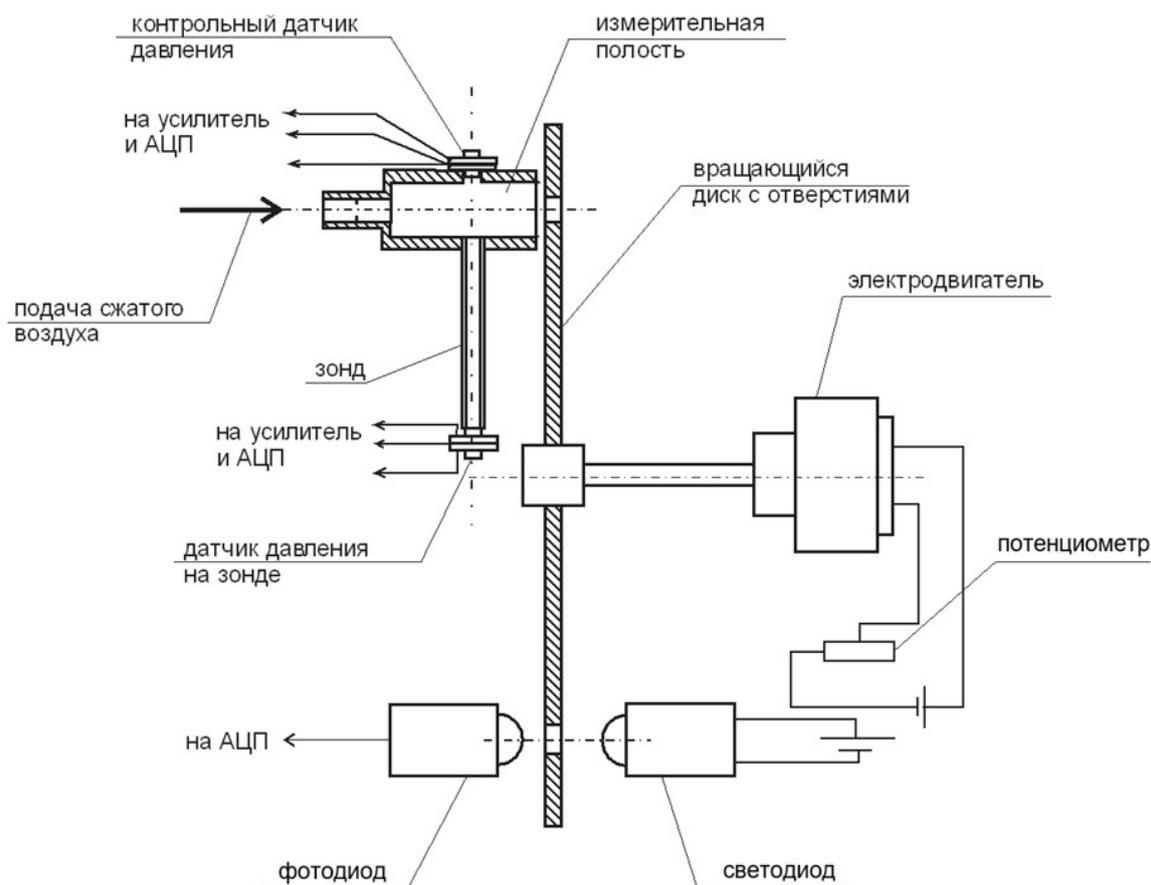


Рис. 3. Схема калибровочного стенда

Многочисленные измерения АЧХ на данном стенде показали, что в используемом диапазоне длин и радиусов зондов (длина зондов в диапазоне 100...6000 мм, радиус зондов 3...5 мм), точное аналитическое решение и результаты, полученные по формуле Кирхгофа, отличаются не более чем на 10%, при этом результаты измерений АЧХ хорошо согласуются с результатами расчётов.

Один из результатов измерения передаточной функции на стенде представлен на рис. 4. При контроле пульсаций давления необходимо выработать методы оценки и накопления результатов измерений. Проводимые измерения содержат большой объём данных, что делает затруднительной запись всех результатов измерений.

В ходе многочисленных экспериментальных исследований были выработаны критерии определения средней частоты и амплитуды колебаний, воспроизводимые в ходе экспериментов и при измерениях в натуральных условиях.

Для определения частоты колебаний используется среднеэнергетическая частота колебаний, для характеристики амплитуды колебаний используется двойная амплитуда колебаний с 90% доверительной вероятностью, для выявления вибрационного горения также используется дополнительный критерий когерентности колебаний с помощью энтропийного коэффициента.

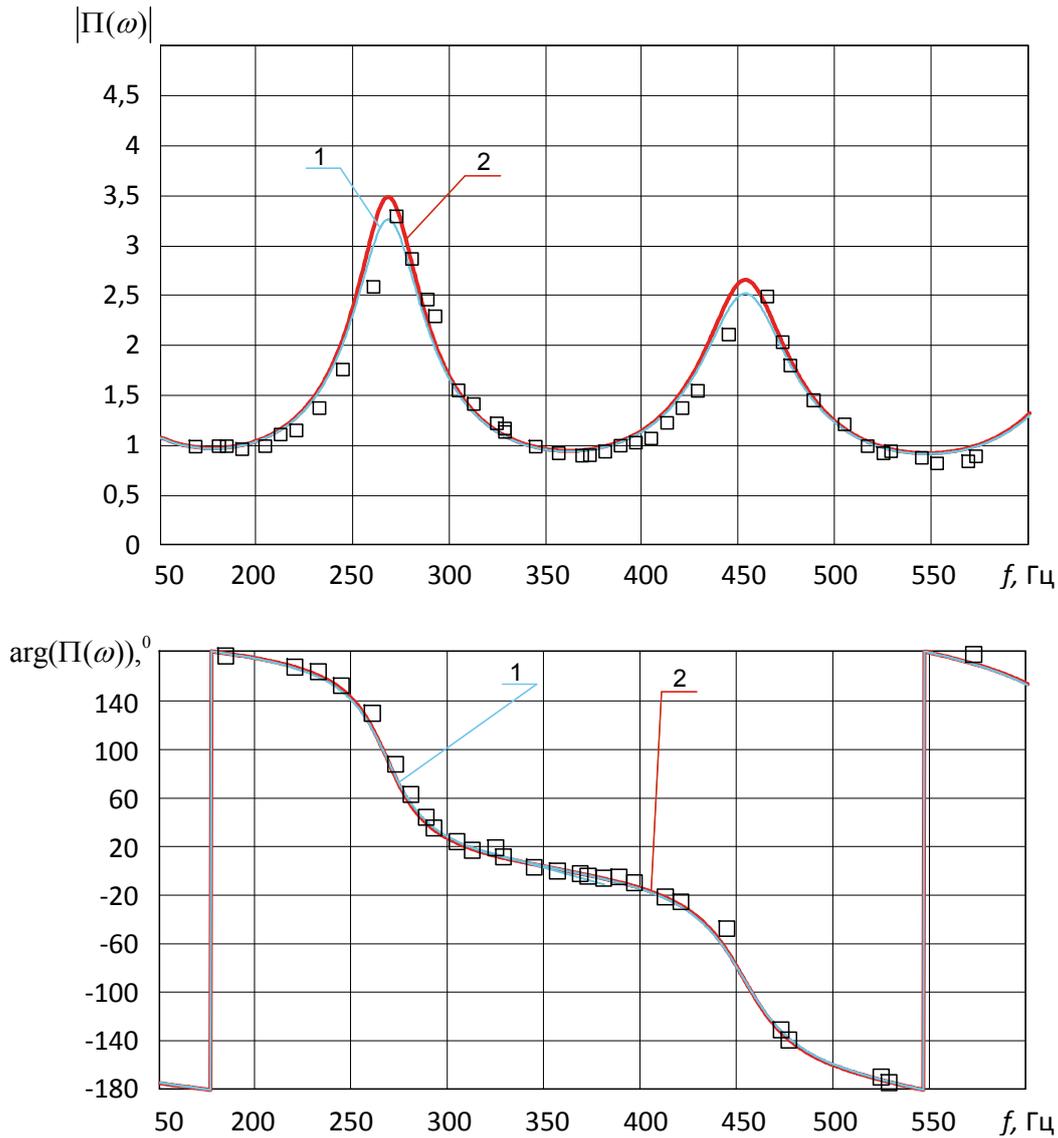


Рис. 4. Результаты измерения передаточной функции для зонда диаметром 3 мм, длиной 983 мм при давлении 101,6 кПа и температуре окружающей среды 23° С:
 1 – точное решение; 2 – расчёт по формуле Кирхгофа

Результаты экспериментов, одни из которых представлены на рис. 5, 6, показывают, что вибрационное горение характеризуется не только частотой и фазой колебаний давления. Если рассмотреть фазовую диаграмму, полученную из пульсаций давления и производной пульсаций давления по времени, то можно видеть, что при возбуждении автоколебаний (рис. 5) возникает устойчивая траектория на фазовой диаграмме. Наличие такой устойчивой траектории, близкой к окружности, на фазовой диаграмме приводит к тому, что гистограмма распределения пульсаций давления стремится к распределению арксинуса (арксинусоидальному распределению). При этом для низких амплитуд пульсаций давления характерен нормальный закон распределения пульсаций давления, соответствующий отсутствию устойчивой траектории на фазовой диаграмме (рис. 6). Данный факт можно численно характеризовать энтропийным коэффициентом, под которым принято считать наибольшее значение погрешности при равномерном законе распределения, которая вносит такое же дезинформационное действие, как и погрешность с любым другим законом распределения [3].

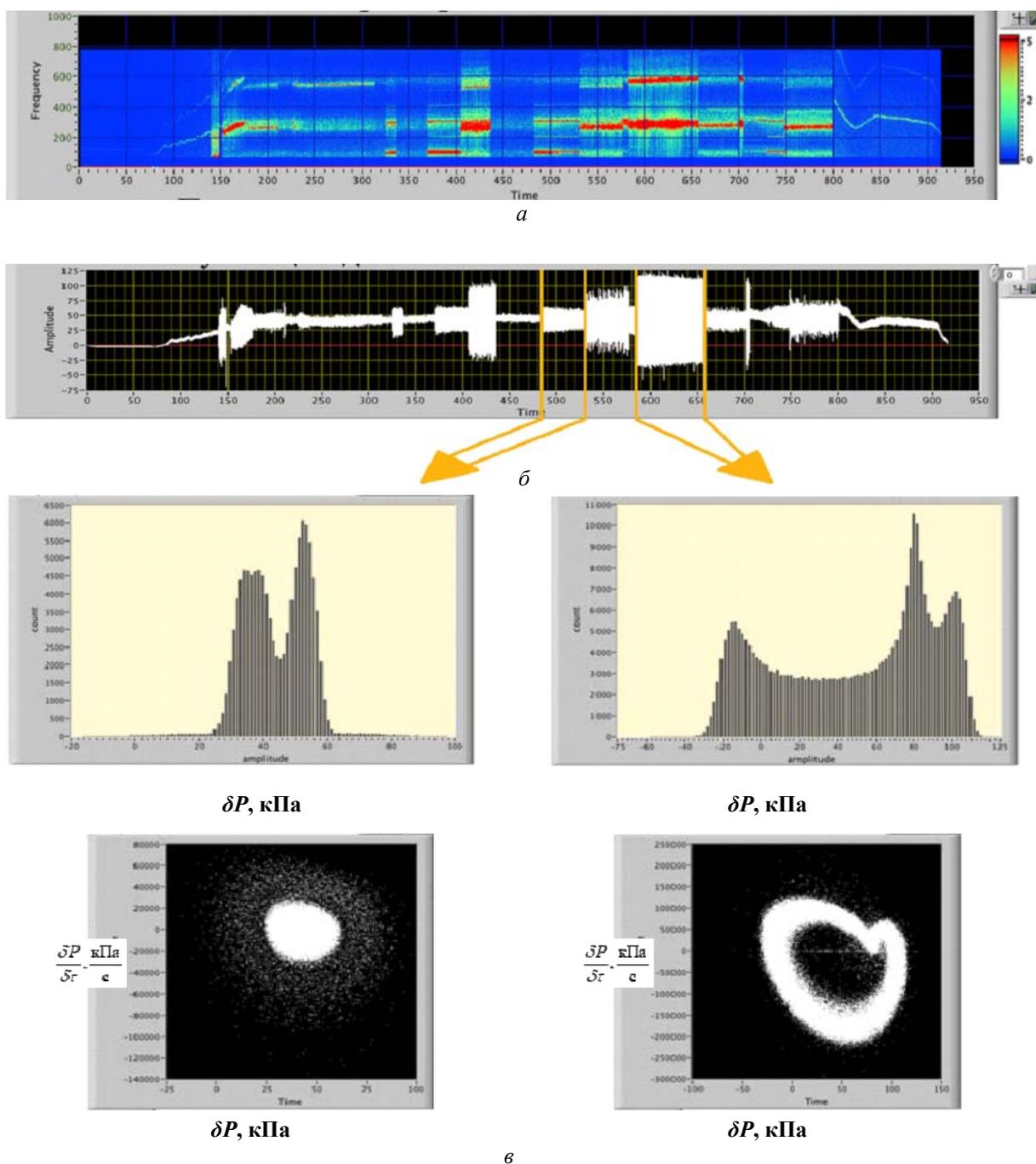


Рис. 5. Гистограммы и фазовые кривые пульсаций давления в лабораторных условиях для опытной горелки ГТК-25ИР с возбуждением автоколебаний:
 а – частотная характеристика; б – пульсации давления;
 в – гистограмма пульсаций давления и распределение вероятности в фазовом пространстве

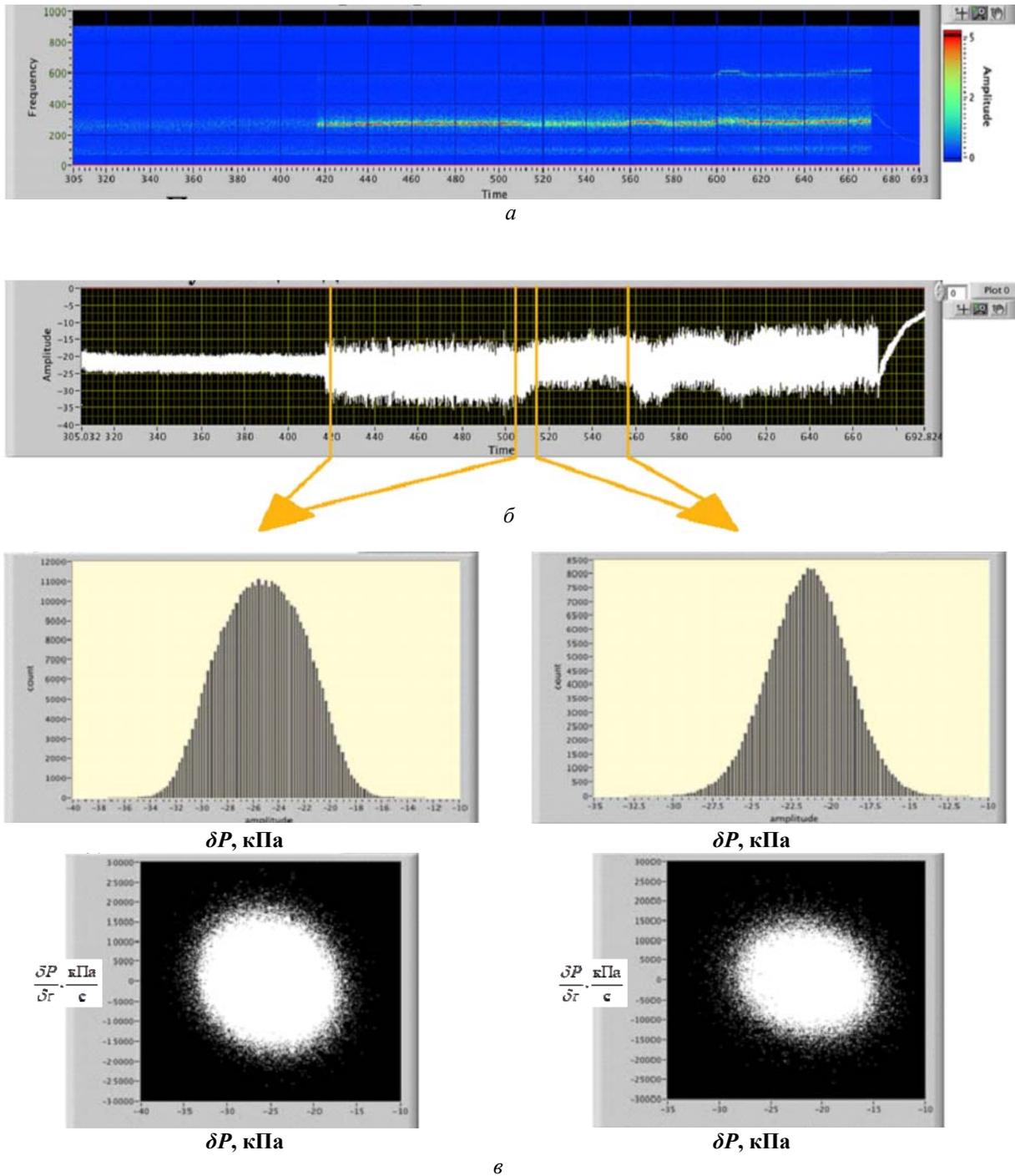


Рис. 6. Гистограммы и фазовые кривые пульсаций давления в лабораторных условиях для опытной горелки ГТК-25ИР, в которой автоколебания были подавлены:
 а – частотная характеристика; б – пульсации давления; в – гистограмма пульсаций давления и распределение вероятности в фазовом пространстве

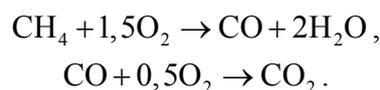
Нормальное распределение имеет наибольший энтропийный коэффициент $\sqrt{\frac{\pi e}{2}} \approx 2,066$, что обусловлено механизмом его получения как суммы бесконечного количества бесконечно малых возмущений и тем самым наименьшей корреляцией между случайными возмущениями. С увеличением скоррелированности данных (усиление

корреляции между возмущениями и является основным свойством вибрационного горения) энтропийный коэффициент снижается и обычно при вибрационном горении составляет 1,5...1,6. Данный факт позволяет отследить усиление корреляции между сигналом в разные моменты времени с помощью энтропийного коэффициента. Энтропийный коэффициент сигнала k_s рассчитывается исходя из построенной гистограммы пульсаций давления по следующей формуле:

$$k_s = \text{Exp} \left(- \sum \psi_i \ln \left(\frac{\psi_i}{\Delta} + 10^{-30} \right) \right) \frac{1}{2\sigma}, \text{ где } \sigma - \text{среднеквадратичное отклонение пульсаций давления; } \psi_i - \text{количество значений пульсаций давления, лежащих в } i\text{-м поддиапазоне, отнесённое к суммарному количеству значений; } \Delta - \text{разница между максимальным и минимальным зафиксированным значением пульсаций давления.}$$

В настоящее время существуют проекты систем контроля пульсаций давления в малоэмиссионных камерах сгорания, в которых предполагается использовать измерение пульсаций давления в воздушном объёме на входе в камеру сгорания вместо измерений пульсаций давления в реакционном объёме внутри камеры сгорания. В частности это касается измерения пульсаций давления на штатных камерах сгорания газотурбинного двигателя ДГ-90. При разработке малоэмиссионной камеры сгорания ДГ-90 осуществлялись измерения пульсаций давления как внутри реакционного объёма камеры сгорания, так и в воздушном объёме на входе в камеру сгорания. Также были проведены расчётные исследования пульсаций давления в камере сгорания. Расчёт производился только для сектора, состоящего из 1/16 камеры сгорания, на границах, отделяющих этот сектор от воздушного объёма камеры сгорания, ставились условия периодичности.

Все расчёты проводились в программе с открытым исходным кодом OpenFOAM [5]. Результаты расчёта пульсаций давления базировались на расчёте стационарного поля температуры с использованием $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Для моделирования горения была использована квазиглобальная модель химической кинетики:



Для расчёта поля акустического давления $\hat{p}_a(\vec{r}, \omega)$ использовалось уравнение в частотном представлении:

$$\nabla \left(- \frac{1}{\rho_c} \nabla \hat{p}_a \right) - \frac{k_{eq}^2}{\rho_c} \hat{p}_a = Q,$$

где Q – источниковый член моделирующий пульсации тепловыделения на выходе из горелки.

В данном уравнении для учёта диссипации пульсаций давления использовалась модель с турбулентной вязкостью, рассчитанной в ходе определения поля температур в камере сгорания:

$$\rho_c = \frac{P_{KC}}{RT} \left(1 + \frac{i\omega\delta}{a^2} \right)^{-1}, \quad a_c = \frac{P_{KC}}{RT} \left(1 + \frac{i\omega\delta}{a^2} \right)^{1/2}, \quad \delta = \frac{RT}{P_{KC}} \left(\frac{4}{3} \mu_t \right), \quad k_{eq} = \frac{\omega}{a_c}, \quad a = \sqrt{kRT},$$

На выходе из камеры сгорания задавались колебания давления с заданной частотой и определялось акустическое поле внутри камеры сгорания, соответствующее данным колебаниям давления.

Результаты расчёта акустического поля давления для частоты 150 Гц представлены на рис. 7. Для представления данных пульсации давления в точке относились к амплитуде пульсаций в точке В. Данные показывают, что амплитуды пульсаций давления в проточной части камеры сгорания существенно различаются.

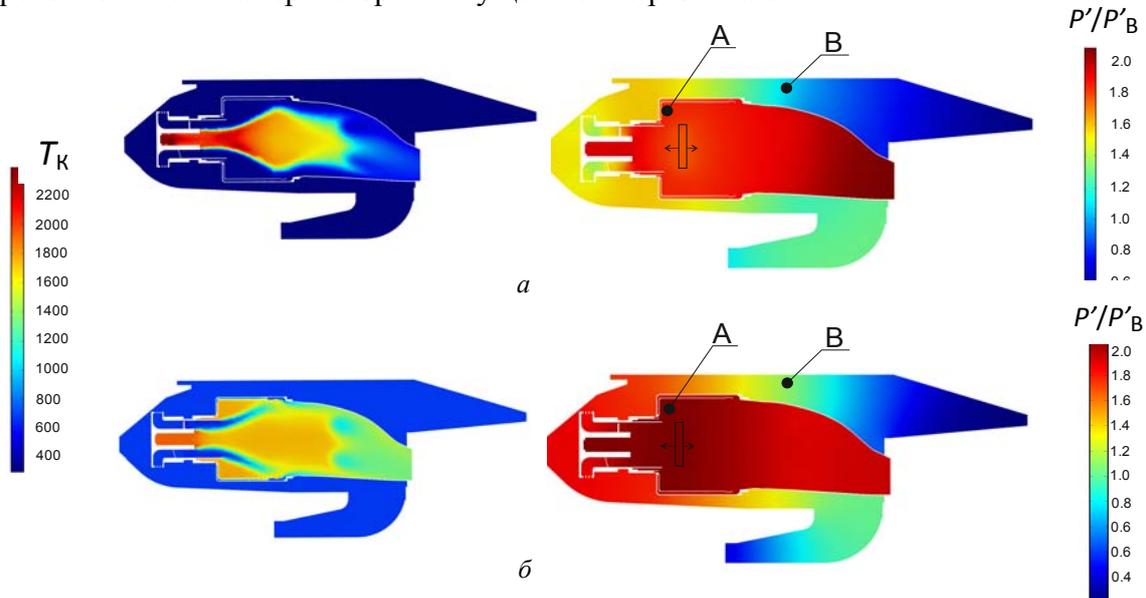


Рис. 7. Поля температуры и пульсационного давления в малоэмиссионной камере сгорания ДГ-90 при различных режимах работы: а – пусковой режим работы; б – номинальный режим работы

Сравнение результатов расчётов с результатами измерений в условиях работы ГПА (рис. 8) показывает, что качественное поведение пульсаций давления в камере сгорания предсказывается верно, однако существует существенный разброс экспериментальных точек, что возможно связано с влиянием распределения пульсирующего тепловыделения в пространстве.

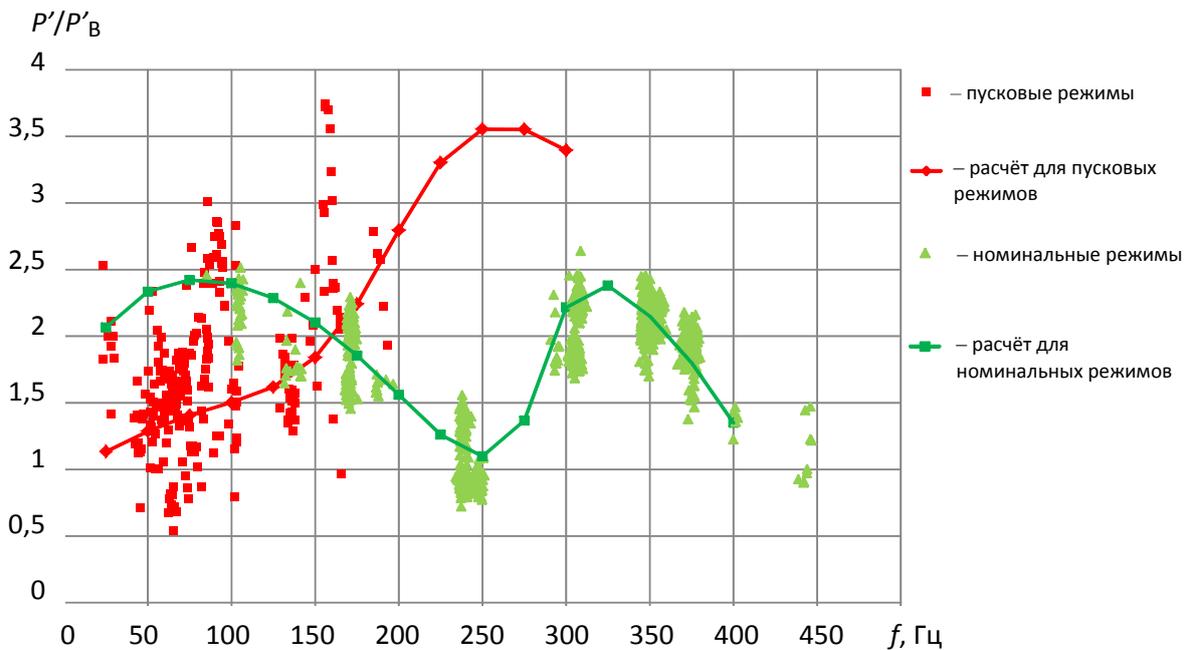


Рис. 8. Влияние частоты на отношение амплитуды пульсационного давления внутри первичной зоны камеры сгорания к амплитуде пульсационного давления в объёме на входе в камеру сгорания для пускового и номинального режимов

Заключение

1. Разработанные и применяемые НПФ «Теплофизика» системы контроля пульсаций давления позволяют измерять пульсационное давление внутри первичной зоны камеры сгорания в течение всего срока её эксплуатации, что позволяет оперативно предупредить возникновение нештатных режимов малоэмиссионных камер сгорания, склонных к возбуждению автоколебаний.

2. Сложный характер распределения пульсационного давления в объёме камеры сгорания не позволяет использовать зонды измерения пульсаций давления в воздушном объёме камеры сгорания для надёжного предотвращения возникновения вибрационного горения в ходе её эксплуатации.

Библиографический список

1. Combustion dynamics instrumentation for the most demanding gas turbine measurement & monitoring requirements.

https://www.pcb.com/contentStore/mktg/IMI_Downloads/IMI-App-Combustion_LowRes.pdf

2. Tijdeman. H. On the propagation of sound waves in cylindrical tubes // Journal of Sound and Vibration. 1975. V. 42, Iss. 1. P. 1-33. DOI: 10.1016/S0022-460X(75)80206-9

3. Метрология и радиоизмерения / под ред. В.И. Нефедова. М.: Высшая школа, 2006. 526 с.

4. Цветков О.В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии и технике. СПб: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 202 с.

5. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. The finite volume method in computational fluid dynamics: An advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab. Springer, 2016. 791 p. DOI: 10.1007/978-3-319-16874-6

SPECIFIC FEATURES OF PRESSURE PULSATION CONTROL IN COMBUSTION CHAMBERS OF LAND BASED GAS TURBINE UNITS

© 2021

D. V. Skiba Candidate of Science (Engineering), Deputy Director for Science;
LLC Scientific-Production Company “Теплофизика”, Ufa, Russian Federation;
d.skiba@teplophysics.ru

D. A. Maksimov Candidate of Science (Engineering), First Deputy Director;
LLC Scientific-Production Company “Теплофизика”, Ufa, Russian Federation;
teplophysics@mail.ru

R. S. Kashapov Candidate of Science (Engineering), Director;
LLC Scientific-Production Company “Теплофизика”, Ufa, Russian Federation;
teplophysics@mail.ru

T. S. Kharisov Lead Technical Development Engineer;
LLC Scientific-Production Company “Теплофизика”, Ufa, Russian Federation;
Postgraduate Student;
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation;
kharisov_ts@mail.ru

LLC SPC “Теплофизика”, developing low-emission combustion chambers with premixing of fuel for ground application gas turbine installations, investigates the problems associated with the occurrence of pressure pulsations in the combustion chambers, as well as with the methods of their registration and measurement. To date, there is no unified method for assessing and calculating the amplitude-frequency characteristics of these pulsations and their measurement in general. This article is based on

many years of experience in measuring and recording pressure pulsations under the conditions of a test bench and operation. Methods for evaluating and accumulating measurement results are presented, criteria for determining the average frequency and amplitude of oscillations are developed, reproducible in the course of experiments and during full-scale measurements. To detect vibrating combustion, an additional criterion of coherence of vibrations is also used with the aid of the entropy coefficient. As a result of the computational and experimental study, we find that the pulsation pressure in the volume of the combustion chamber does not allow the use of probes for measuring pressure pulsations in the air volume of the combustion chamber to reliably prevent the occurrence of vibrating combustion during its operation.

Low emission combustion chamber; fuel pre-mix; vibrating combustion; measurement of pressure pulsations

Citation: Skiba D.V., Maksimov D.A., Kashapov R.S., Kharisov T.S. Specific features of pressure pulsation control in combustion chambers of land based gas turbine units. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 4. P. 40-51. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-40-51

References

1. Combustion dynamics instrumentation for the most demanding gas turbine measurement & monitoring requirements. Available at: https://www.pcb.com/contentStore/mktg/IMI_Downloads/IMI-App-Combustion_LowRes.pdf
2. Tijdeman. H. On the propagation of sound waves in cylindrical tubes. *Journal of Sound and Vibration*. 1975. V. 42, Iss. 1. P. 1-33. DOI: 10.1016/S0022-460X(75)80206-9
3. *Metrologiya i radioizmereniya / pod red. V.I. Nefedova* [Metrology and radio measurement]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 2006. 526 p.
4. Tsvetkov O.V. *Entropiyyny analiz dannykh v fizike, biologii i tekhnike* [Entropic data analysis in physics, biology and engineering]. SPb: ETU «LETI» Publ., 2015. 202 p.
5. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The finite volume method in computational fluid dynamics: An advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab*. Springer, 2016. 791 p. DOI: 10.1007/978-3-319-16874-6