



АКСИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА И СКОРОСТИ ЗВУКА В ТРУБЕ С ЗАКРУЧЕННЫМ ПЛАМЕНОМ

Малахов А.О., Ларионов В.М., Константинов Н.В.

Казанский федеральный (Приволжский) университет, г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0341-915X>; AIOMalahov@kpfu.ru

Резюме: Ранее было проведено экспериментальное и теоретическое исследование пульсационного горения в трубе с тангенциальной подачей смеси пропан-бутанового топлива с воздухом. Было обнаружено, что результаты расчета частот колебаний газа значительно расходятся с экспериментальными данными. Одной из причин является гипотетический характер аксиального распределения скорости звука в камере сгорания. В данной работе это распределение находится на основании расчетно-экспериментальных данных о температуре газа. **ЦЕЛЬ.** Определение аксиального распределения скорости звука в трубе с тангенциальной подачей смеси пропан-бутанового топлива с воздухом на основании результатов расчета температуры газа на входе трубы и результатов измерений температуры газа на выходе трубы. **МЕТОДЫ.** Использовалось известное соотношение, связывающее скорость звука с температурой газа. Средняя по сечению температура газа на входе трубы находилась по известной полуэмпирической формуле. Вычисляя соответствующую скорость звука, определяем первый коэффициент линейного распределения скорости звука вдоль трубы. Скорость звука на выходе трубы вычислялась после усреднения значения температуры газа, измеренных термопарой вблизи стенки трубы и на её оси. Разница скоростей звука на концах трубы, отнесенная к её длине – это градиент скорости звука, т.е. второй коэффициент искомого распределения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В работе описаны теоретическое и экспериментальное исследование пульсационного горения в трубе с тангенциальной подачей смеси пропан-бутанового топлива с воздухом. Получены зависимости коэффициентов распределения скорости звука от коэффициента избытка воздуха смеси пропан-бутанового топлива с воздухом и амплитуды колебаний давления на входе рассматриваемой экспериментальной камеры сгорания. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработана расчетно-экспериментальная методика определения аксиального распределения скорости звука в трубе при горении в закрученном потоке. Для рассмотренной экспериментальной установки показано, что максимальное значение модуля градиента скорости звука соответствует коэффициенту избытка смеси пропан-бутанового топлива с воздухом, равному единице. Для всех значений коэффициента избытка воздуха градиент скорости звука в режиме пульсационного горения в 1,52 раза больше, чем при горении без колебаний газа. Полученные результаты будут использованы для расчета условий возбуждения и частоты колебаний газа в рассматриваемой экспериментальной камере сгорания.

Ключевые слова: труба; закрученное пламя; колебания газа; температура газа; градиент скорости звука.

Для цитирования: Малахов А.О., Ларионов В.М., Константинов Н.В. Аксиальное распределение температуры газа и скорости звука в трубе с закрученным пламенем. 2022. Т.24. № 6. С. 63-71. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-63-71.

AXIAL DISTRIBUTION OF GAS TEMPERATURE AND SOUND SPEED IN A PIPE WITH A SWIRLED FLAME

AO. Malahov, VM. Larionov, NV. Konstantinov

Kazan Federal University

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0341-915X>; AIOMalahov@kpfu.ru

Abstract: Earlier, an experimental and theoretical study of pulsating combustion in a pipe with a tangential supply of a mixture of propane-butane fuel with air was carried out. It was found that the results of calculating the frequencies of gas oscillations differ significantly from the

experimental data. One of the reasons is the hypothetical nature of the axial distribution of the speed of sound in the combustion chamber. In this work, this distribution is found on the basis of calculated and experimental data on the gas temperature at the ends of the pipe.

Keywords: pipe; swirling flame; gas oscillations; gas temperature; sound-speed gradient.

For citation: Malahov AO, Larionov VM, Konstantinov NV. Axial distribution of gas temperature and sound speed in a pipe with a swirled flame. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):63-71. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-63-71.

Введение

Известно, что в камерах сгорания газотурбинных установок (ГТУ) процесс горения может стать неустойчивым [1]. Возникающие при этом интенсивные колебания газа нарушают стабильность работы установки и должны быть устранены. Поэтому были разработаны методы автоматического контроля устойчивости процесса горения [2, 3]. Однако, эти методы оказались малоэффективными из-за недостатка экспериментальных данных и несовершенства математических моделей процесса возбуждения колебаний газа в камерах сгорания с закрученным пламенем [4]. В настоящее время ведутся исследования влияния акустических колебаний газа на скорость тепловыделения закрученного пламени [4, 5]. Методом возмущений проведен теоретический анализ самовозбуждения колебаний газа в канале с сосредоточенной [6] и распределенной [7] зоной горения. В этих работах изменение средней температуры газа и скорости звука вдоль канала не учитывалась. Однако, в современных ГТУ помимо естественного охлаждения продуктов сгорания вследствие теплопередачи к стенкам камеры сгорания используется охлаждение в результате ввода в поток воды или воздуха с целью снижения выхода окислов азота в атмосферу. В результате появляется аксиальное распределение средней температуры газа. В работе [8] было получено уравнение частот колебаний газа при горении в трубе при условии, что скорость звука в направлении от входа к выходу убывает по линейному закону. Это уравнение было использовано для трубы с тангенциальной подачей смеси пропан-бутанового топлива с воздухом [9, 10]. Была получена полуэмпирическая формула, определяющая скорость звука на входе трубы в зависимости от коэффициента избытка воздуха смеси α . Градиент скорости звука был представлен в виде двух слагаемых, где первое слагаемое градиент скорости звука в отсутствие колебаний. Из-за недостатка экспериментальных данных предполагалось, что охлаждение газа до температуры окружающей среды для всех значений α , от зоны горения до выхода камеры сгорания, происходило за такое же расстояние, как и при стехиометрическом горении $\alpha=1$. Второе слагаемое характеризует влияние амплитуды колебаний газа, обусловленное тем, что колебания газа ускоряют теплопередачу от газа к стенкам трубы. Предполагалось, что второе слагаемое прямо пропорционально амплитуде колебаний давления на входе трубы. Были проведены расчеты, которые показали, что за исключением значений, близких к $\alpha=1$, результаты вычислений частот колебаний не согласуются с экспериментальными данными. Одной из причин такого расхождения может быть то, что предположения, сделанные для определения градиента скорости звука, не соответствуют реальному процессу теплопередачи стенкам камеры сгорания. Цель данной работы – определение аксиального распределения скорости звука в трубе с тангенциальной подачей смеси пропан-бутанового топлива с воздухом на основании измерения температуры газа на концах трубы в отсутствие колебаний газа и в режиме пульсационного горения.

Приоритетным направлением использования технологий колебаний потока газа является энергетическая промышленность. Первая область применения относится к загрязнению теплообменного оборудования, что приводит к серьезным экономическим убыткам. Практическим решением является реализация пульсационного метода очистки. Анализ механики соударения частиц о поверхности теплообменников показал, что пульсационный поток способствует уменьшению пластичных отложений [12]. Второй не менее важной областью применения технологии является утилизация тяжело горючих энергоносителей. Так для слоевого сжигания твердого топлива, в частности твердых техногенных отходов, перспективными считаются коаксиальные системы, позволяющие обеспечить поступление вторичного воздуха в зону горения [13].

Научная новизна работы заключается в ряде полученных результатов и использованных методов. Впервые для исследования пульсационного горения в вихревых камерах сгорания применён «энергетический» метод [14, 15], показана его эффективность

для определения условий возбуждения колебаний газа. Используемая методика расчёта частот автоколебаний газа учитывает влияние амплитуд колебаний давления в камере сгорания на продольные градиенты скорости звука, а также вводит поправочный коэффициент для расчёта средней по сечению камеры сгорания температуры в зоне горения, что ранее при расчёте частот не учитывалось. Результаты данной работы могут быть использованы в разработке универсальной математической модели процессов вихревого горения, а также возникающих в процессе энергетических колебаний потока.

Материалы и методы

Экспериментальная часть исследования проводилась на стенде (рис. 1), который ранее был использован в работах [9, 10]. Камера сгорания – цилиндрическая труба, открытая на входе. На входе имеются четыре патрубка для тангенциальной подачи смеси пропан-бутанового топлива с воздухом, которые равномерно распределены по периметру трубы. Однако, из-за наличия системы подачи в виде патрубков и трубопроводов подвода топливовоздушной смеси, камера проявляет свойства четвертьволнового резонатора. В камере сгорания используется предварительно подготовленная топливовоздушная смесь: пропан-бутан поступает из баллона, смешивается с воздухом из компрессора и распределяется по патрубкам. Расходы топлива и воздуха контролировались цифровым (Mass Flow, рис. 2) и аналоговым ротаметрами (рис. 1 (22)). Температура газа измерялась вольфрам-рениевой термопарой ВР-5/20 (толщина проволоки 0,5 мм), подключенной к цифровому прибору Ф266 (рис. 2). Измерение амплитуды колебаний газа производилось акустическим зондом, связанным с звуковой платой компьютера. Согласно цели работы необходимо определить распределение скорости звука вдоль трубы в линейном приближении. Следовательно, достаточно найти значения температуры газа на входе и выходе трубы, а также учесть, что скорость звука прямо пропорциональна квадратному корню из температуры. Средняя по сечению температура газа на входе трубы находилась по известной полуэмпирической формуле [11]. Вычислялась после усреднения значения температуры газа, измеренных термопарой вблизи стенки трубы и на её оси. Разница скоростей звука на концах трубы, отнесенная к её длине – это градиент скорости звука, т.е. второй коэффициент искомого распределения. Для оценки температур помещения, поступающей на вход камеры сгорания газозвушной смеси и температуры потока газа (продуктов реакции) на выходе из камеры сгорания был использован блок термопар ТХА (хромель-алюмелевые) с подключаемым мультиметром *Richmeters 102* (рис. 2).

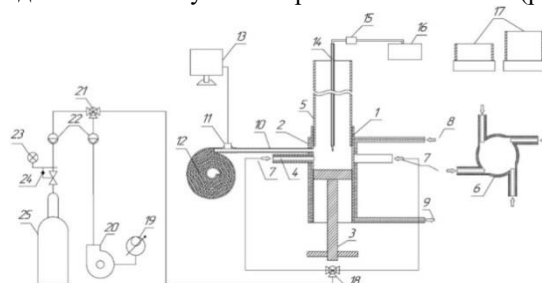


Рис. 1. Схема экспериментального стенда 1 – входная камера, 2 – охлаждающий контур, 3 – винтовой поршень, 4 – патрубок подачи топливовоздушной смеси, 5 – цилиндрическая труба–резонатор, 6 – схема расположения патрубков, 7 – трубопроводы подвода смеси к патрубкам, 8, 9 – вход и выход охлаждающей воды, 10 – акустический зонд, щуп, 11 – микрофон, 12 – спиралевидная звукопоглощающая трубка, 13 – компьютер, 14 – термопара ВР 5/20, 15 – компенсатор холодного спая, 16 – цифровой прибор Ф266, 17 – дополнительные секции трубы–резонатора, 18 – распределитель смеси по трубкам, 19 – лабораторный автотрансформатор, 20 – воздушный компрессор, 21 – смеситель топлива с воздухом, 22 – ротаметры, 23 – автоматический регулирующий клапан, 24 – газовый редуктор, 25 – баллон с сжиженным топливом (пропан–бутан)

Fig. 1. Scheme of the experimental stand
1 – inlet chamber, 2 – cooling circuit, 3 – screw piston, 4 – air-fuel mixture supply pipe, 5 – cylindrical resonator pipe, 6 – piping layout, 7 – pipelines for supplying the mixture to the nozzles, 8, 9 – cooling water inlet and outlet, 10 – acoustic probe, probe, 11 – microphone, 12 – spiral sound-absorbing tube, 13 – computer, 14 – thermocouple VR 5/20, 15 – cold junction compensator, 16 – digital device F266, 17 – additional sections for resonator tube, 18 – pipe mix distributor, 19 – laboratory autotransformer, 20 – air compressor, 21 – air fuel mixer, 22 – rotameters, 23 – automatic control valve, 24 – gas reducer, 25 – liquefied fuel tank (propane-butane)



Рис. 2. Измерительные приборы (слева направо): газовый расходомер Mass Flow, мультиметр Richmeters 102, цифровой прибор Ф266

Fig. 2. Measuring instruments (from left to right): Mass Flow gas flow meter, Richmeters 102 multimeter, F266 digital instrument

Результаты

В данной работе было использовано линейное приближение для распределения скорости звука:

$$c(x) = a - bx, 0 \leq x \leq l_c, \tag{1}$$

где l_c - длина труба.

На входе в трубу, полагая $x = 0$, имеем $c(0) = a$, на выходе из трубы при $x = l_c$ получим $c(l_c) = c_1$. Тогда модуль градиента скорости звука равен:

$$b = (a - c_1)/l_0 \tag{2}$$

Скорость звука $c(0)$ зависит от средней температуры газа в входном сечении камеры сгорания. Горение смеси происходит в кольце, расположенном вблизи стенки трубы (рис. 3). В этой области температура газа равна температуре горения, которую для смеси пропан-бутанового топлива можно вычислить по известным [12] формулам:

$$T'_c = T_1 + \frac{10^3 \alpha}{0,084 + 0,452\alpha}, \alpha \leq 1; \tag{3}$$

$$T'_c = T_1 + \frac{10^3}{0,084 + 0,452\alpha}, \alpha > 1. \tag{4}$$

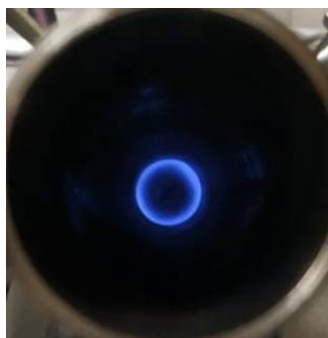


Рис. 3. Закрученная пламя в трубе (вид сверху)

Fig. 3. Swirling flame in a pipe (top view)

Температура газа в центре входного сечения находилась экспериментально с помощью ВР 5/20 термопары. Вычисления и измерения, выполненные для горения смеси с коэффициентом избытка воздуха 0,8; 1,0; 1,2 показали, что среднеарифметическое значение температур газа у стенки и на оси трубы можно находить по формуле:

$$T_c = \theta_c T'_c, \tag{5}$$

В которой эмпирическая константа θ_c равна 0,75.

Тогда из соотношений (1) – (5) получим:

$$a = a(\alpha) = c_1 \sqrt{\frac{T_c(\alpha)}{T_1}} \tag{6}$$

В таблице 1 приведены результаты вычислений, выполненных с использованием выражений (1) – (6). Было принято, что при температуре газа $T_1 = 293K$, скорость звука c_1 равна 343 м/с.

Таблица 1

Определение скорости звука на входе в трубу									
α	0,84	0,9	0,93	1,0	1,04	1,08	1,12	1,17	1,22
$T'_{c, K}$	2105	2127	2137	2157	2098	2041	1962	1925	1862
T_c, K	1576	1593	1600	1615	1571	1528	1484	1441	1394
$a, \text{м/с}$	795	800	802	806	794	783	772	761	748

Входящая в формулу (6) скорость звука c_1 определялась на основании измерений температуры газа на входе трубы. Использовались данные для трубы-камеры сгорания данной $l_c = 0,45\text{м}$ с двухтрубковой подачей смеси с расходом воздуха 25,8 л/мин. Так же, как для входного сечения находилось среднеарифметическое значение температур газа у стенки и на оси трубы. Измерения проводились для двух режимов горения – пульсационного и установившегося (без колебаний газа). Ясно, что температура газа на выходе из трубы постоянной длины, при постоянном расходе воздуха будет зависеть от температуры газа на входе в трубу, а следовательно, от коэффициента избытка воздуха. Средние значения температуры газа на выходе трубы в отсутствие колебаний газа $T_{l,0}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Определение градиента скорости звука при горении без колебаний									
α	0,84	0,9	0,93	1,0	1,04	1,08	1,12	1,17	1,22
T_l, K	718	708	671	645	683	664	683	669	648
$c_{l,0}, \text{м/с}$	537	533	519	509	524	516	524	518	510
$b_{\alpha}, \text{с}^{-1}$	575	592	628	659	601	593	552	538	529

Полагая $x = l_c$, получим выражение, определяющее скорость звука на выходе камеры сгорания:

$$c_{l,0} = a(\alpha) - b_{\alpha} l_c$$

Эту скорость звука можно вычислить по формуле:

$$c_{l,0} = c_1 \sqrt{T_{l,c}(\alpha) / T_1} \quad (7)$$

Тогда соотношение, определяющее модуль градиента скорости звука в трубе при горении без колебаний газа, имеет вид:

$$b_{\alpha} = b_{\alpha}(\alpha) = (a(\alpha) - c_{l,0}(\alpha)) / l_c \quad (8)$$

Результаты вычислений согласно выражениям (7), (5) даны в таблице 2. Аппроксимация полученных данных показала, что модуль градиента скорости звука можно представить в виде двух функций:

$$b_{\alpha} = 134 + 525\alpha, \text{ если } \alpha \leq 1, \quad (9)$$

$$b_{\alpha} = 4972 - 7367,6 \cdot \alpha + 3054,5 \cdot \alpha^2, \text{ если } \alpha > 1. \quad (10)$$

Результаты аппроксимации (рис. 4) говорят о том, что при $\alpha = 1$ модуль градиента скорости звука в отсутствие колебаний имеет максимум.

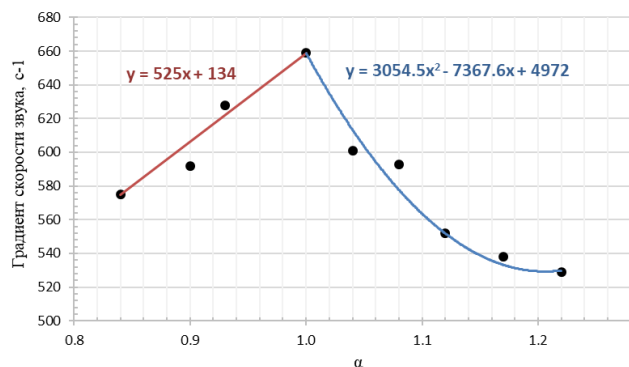


Рис. 4. Зависимость модуля градиента скорости звука в отсутствие колебаний от коэффициента избытка воздуха

Fig. 4. Dependence of the sound velocity gradient module in the absence of oscillations on the coefficient of excess air

В таблице 3 приведены результаты измерений температуры газа T_l на выходе трубы в режиме пульсационного горения. Сравнение с данными таблицы 2 показывает, что для одинаковых значений α температура газа T_l значительно меньше температуры $T_{l,0}$. Это ожидаемый результат, т.к. колебаний газа ускоряют теплопередачу от газа к стенке трубы, что приводит к значительному уменьшению температуры газа на выходе камеры сгорания.

Скорость звука на выходе находилась по формуле, аналогичной (7):

$$c_l = c_1 \sqrt{T_l(\alpha)/T_1}$$

Модуль градиента скорости звука вычисляется по формуле, аналогичной (8):

$$b_\alpha = (a(\alpha) - c_l(\alpha)) / l_c$$

Значения этих двух величин даны в таблице 3, где также приведены соответствующие экспериментальные данные по частоте и амплитуде колебаний газа p_c на входе в камеру сгорания. Интервал изменения частоты колебаний – небольшой, поэтому ее влияние на распределение скорости звука не рассматривалось. Чтобы описать влияние амплитуды колебаний газа на модуль градиента скорости звука, представим его в следующем виде:

$$b = b(\alpha, p_c) = \beta_p(p_c) \cdot b_\alpha(\alpha) \tag{11}$$

где функция усиления β_p показывает во сколько раз колебаний газа с амплитудой p_c увеличивают абсолютное значение модуля градиента скорости звука по сравнению с его величиной в отсутствие колебаний. Значения функции усиления с учетом выражения (11) рассчитываются по формуле:

$$\beta_p = b(\alpha, p_c) / b_\alpha(\alpha) \tag{12}$$

Таблица 3

Определение градиента скорости звука при наличии колебаний

α	0.84	0.9	0.93	1.0	1.04	1.08	1.12	1.17	1.22
T_l, K	378	370	360	350	368	366	355	369	375
$c_l, \text{м/с}$	390	385	380	375	384	383	378	385	388
$b, \text{с}^{-1}$	902	920	934	958	911	888	876	834	800
$P_c, \text{Па}$	51	90	240	1563	142	113	51	38	31
β_p	1.57	1.55	1.49	1.45	1.51	1.50	1.59	1.55	1.51
$f, \text{Гц}$	275	268	264	257	264	269	272	274	273

Усредняя результаты вычислений, получим, что в режиме пульсационного горения с амплитудой колебаний давления выше 31 Па модуль градиента скорости звука в 1,52 раза больше по сравнению с режимом горения без колебаний газа.

Эксперимент показал, что переход от устойчивого к пульсационному горению происходит в узком интервале изменения коэффициента избытка воздуха $\Delta\alpha \approx 0,02$. В этом интервале амплитуда колебаний газа нестабильна, поэтому в таблице 3 отсутствуют данные для $p_c < 31$ Па. Было решено использовать простейшую линейную аппроксимацию, соответствующую условиям: $\beta_p = 1$, если $p_c = 0$; $\beta_p = 1,52$, если $p_c = 31$ Па. Этим условиям соответствует функция:

$$\beta_p = 1 + 0,017 p_c \tag{13}$$

В результате, с учетом выражений (11) - (13) градиент скорости звука в режиме пульсационного горения определяется следующим образом:

$$b = (1 + 0,017 p_c) b_\alpha, \text{ если } 0 \leq p_c \leq 31 \text{ Па,}$$

$$b = 1,52 b_\alpha, \text{ если } p_c \geq 31 \text{ Па,}$$

где b_α находится из ранее полученных выражений (9), (10).

Заключение

Разработана расчетно-экспериментальная методика определения аксиального распределения скорости звука в трубе при горении в закрученном потоке. Для рассмотренной экспериментальной установки показано, что максимальное значение модуля градиента скорости звука соответствует коэффициенту избытка смеси пропан-бутанового топлива с воздухом, равному единице. Для всех значений коэффициента избытка воздуха модуль градиента скорости звука в режиме пульсационного горения в 1,52 раза больше, чем при горении без колебаний газа. Полученные результаты будут использованы для расчета условий возбуждения и частоты колебаний газа в рассматриваемой экспериментальной камере сгорания.

Литература

1. T. Lieuwen, B.T. Zinn, Theoretical investigation of combustion instability mechanisms in lean, premixed gas turbines, AIAA Paper (1998) 98-0641.
2. A.S. Morgans, S.R. Stow, Model-based control of combustion instabilities in annular combustors, Combustion and Flame 150 (2007) 380-399.
3. D. Durox, J.P. Moeck, J.F. Bourgooin, T. et al. Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control, Combust. Flame 160 (2013) 1729-1742.
4. Wu G. et al. Characterizing nonlinear interaction between a premixed swirling flame and acoustics: Heat-driven acoustic mode switching and triggering // Energy. – 2018. – Т. 158. – С. 546-554.
5. A.M. Steinberg, I. Boxx, M. Störh, et al. Flow-flame interactions causing acoustically coupled heat release fluctuations in a thermo-acoustically unstable gas turbine model combustor, Combust. Flame 157 (2010) 2250-2266.
6. Bloom F., Terlyga O., Patterson T. Perturbation analysis of self-sustained oscillations in a pulse combustion model // Nonlinear Analysis: Real World Applications. – 2010. – Т. 11. – №. 4. – С. 2314-2334.
7. S. Kato T., Fujimori A.P. Dowling, et al. Effects of heat release distribution on combustion oscillation, Proceedings of the combustion institute 30 (2005) 1799-1806.
8. Iovleva O.V., Larionov V.M., Semenova E.V. Frequencies of gas oscillations in a pipe with a concentrated heat source // Journal of Physics: Conference Series 669 (2016) 012023 doi:10.1088/1742-6596/669/1/012023.
9. Malakhov A. O. et al. Analysis of the effect of combustion chamber length on the gas oscillations characteristics // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1923. – №. 1. – С. 012023.
10. Malakhov A. O. et al. Acoustic oscillations of the gas with axial distribution of average temperature in the vortex combustion chamber // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. Т. 1923. – №. 1. – С. 012022.
11. Malahov A. O. et al. Pulsating combustion of propane-butane fuel mixture with air in a vortex combustion chamber // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. Т. 1588. №. 1. С. 012026.
12. Хайбуллина А. И., Зиннатуллин Н. Х., Ильин В. К. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2021. – Т. 23. – №. 1. – С. 59-67.
13. Семенова Е. В. и др. Частоты колебаний газа при горении твердого топлива в коаксиальных трубах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2017. – Т. 19. – №. 1-2. – С. 164-169.
14. Ларионов В. М., Зарипов Р. Г. Автоколебания газа в установках с горением // Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2003.
15. Семенова Е. В., Ларионов В. М., Ваньков Ю. В. Термодинамический и акустический анализ пульсационного горения твердого топлива в устройстве типа резонатора Гельмгольца // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2018. – Т. 20. – №. 5-6. – С. 141-147.

Авторы публикации

Малахов Алексей Олегович – младший научный сотрудник НИЛ «Реологические и термохимические исследования», ФГАОУ ВО КФУ.

Ларионов Виктор Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Техническая физика и энергетика», ФГАОУ ВО КФУ.

Константинов Никита Вячеславович – аспирант кафедры «Техническая физика и энергетика», ФГАОУ ВО КФУ.

References

1. T. Lieuwen, B.T. Zinn. *Theoretical investigation of combustion instability mechanisms in lean, premixed gas turbines*. AIAA Paper (1998):98-0641.
2. A.S. Morgans, S.R. Stow. *Model-based control of combustion instabilities in annular combustors*. *Combustion and Flame* 150 (2007):380-399.
3. D. Durox, J.P. Moeck, J.F. Bourgooin, et al. *Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control*, *Combust. Flame* 160 (2013):1729-1742.
4. Wu G. et al. Characterizing nonlinear interaction between a premixed swirling flame and acoustics: Heat-driven acoustic mode switching and triggering. *Energy*. 2018;158:546-554.
5. A.M. Steinberg, I. Boxx, M. Störh, et al. *Carter, Flow-flame interactions causing acoustically coupled heat release fluctuations in a thermo-acoustically unstable gas turbine model combustor*, *Combust. Flame* 157 (2010):2250-2266.
6. Bloom F, Terlyga O, Patterson T. Perturbation analysis of self-sustained oscillations in a pulse combustion model. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. 2010;11(4):2314-2334.
7. S. Kato, T. Fujimori, A.P. Dowling, et al. *Effects of heat release distribution on combustion oscillation*. *Proceedings of the combustion institute* 30 (2005):1799-1806.
8. Semenova EV, Larionov VM, Semenova EV. Frequencies of gas oscillations in a pipe with a concentrated heat source. *Journal of Physics: Conference Series* 669 (2016) 012023 doi:10.1088/1742-6596/669/1/012023.
9. Malakhov A. O. et al. Analysis of the effect of combustion chamber length on the gas oscillations characteristics. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021;1923(1):012023.
10. Malakhov AO. et al. Acoustic oscillations of the gas with axial distribution of average temperature in the vortex combustion chamber. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021;1923(1):012022.
11. Malahov AO. et al. Pulsating combustion of propane-butane fuel mixture with air in a vortex combustion chamber. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020;1588(1):012026.
12. Hajbullina AI, Zinnatullin NH, Il'in VK. Povyshenie effektivnosti raboty teploobmennogo oborudovaniya ispol'zovaniem pul'sacionnyh metodov ochistki. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2021;23(1):59-67.
13. Semenova EV, et al. CHastoty kolebanij gaza pri gorenii tverdogo topliva v koaksial'nyh trubah. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2017;19(1-2):164-169.
14. Larionov VM, Zaripov RG. *Avtokolebaniya gaza v ustanovkah s goreniiem*. Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tekhnich. un-ta, 2003. 237 p.
15. Semenova EV, Larionov VM, Van'kov YUV. Termodinamicheskij i akusticheskij analiz pul'sacionnogo goreniya tverdogo topliva v ustrojstve tipa rezonatora Gel'mgol'ca. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2018;20(5-6):141-147.

Authors of the publication

Aleksey O. Malakhov – Kazan Federal University, Russia.

Victor M. Larionov – Kazan Federal University, Russia.

© Малахов А.О., Ларионов В.М., Константинов Н.В.

Nikita V. Konstantinov – Kazan Federal University, Russia.

Получено

18.10.2022г.

Отредактировано

25.11.2022г.

Принято

01.12.2022г.