

Авиационная и ракетно-космическая техника


УДК 641.454.2

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-9-74-81

Определение акустических характеристик проточного тракта переменного сечения лабораторной установки*

К.Ю. Арефьев^{1,2,3}, М.А. Ильченко³¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² МФТИ, 141700, Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация, Институтский пер., д. 9³ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2

The Determination of the Flow Acoustic Characteristics in a Duct with Variable Cross-Section of a Laboratory Unit

K.Y. Arefyev^{1,2,3}, M.A. Ilchenko³¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² Moscow Institute of Physics and Technology, 140090, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, Institutskiy pereulok, Bldg. 9³ Federal State Unitary Enterprise Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM, 111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2 e-mail: arefyev@ciam.ru, 012@ciam.ru

i При изучении влияния нестационарных и периодических процессов на горение топливных смесей важно определить и предварительно спрогнозировать интенсивность пульсаций давления и скорости вблизи зоны протекания химических реакций. При выборе диапазонов частоты и амплитуды вынужденного воздействия в экспериментальном исследовании следует учитывать акустические характеристики проточного тракта лабораторной установки. В ряде случаев для предварительного прогнозирования акустических характеристик проточного тракта переменного сечения необходимо провести специальное математическое моделирование. Рассмотрены вопросы математического моделирования спектральной характеристики собственных колебаний газа в лабораторной установке для исследования диффузионного и кинетического горения топливных смесей. Разработанная и реализованная в специализированном модуле математическая модель позволяет определять влияние геометрических и режимных характеристик на резонансные частоты. Выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Предложенная математическая модель и результаты вычислений могут быть полезны при выборе конфигурации экспериментальной установки и прогнозировании резонансных режимов с возбуждением интенсивных пульсаций скорости газа в зоне горения.

Ключевые слова: резонансные частоты, пульсации скорости, изоэнтропические акустические колебания, термоанемометр, спектральная характеристика

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-79-10503.

i When studying the influence of non-stationary and periodic processes on the fuel mixtures combustion, it is important to predict and determine the intensity of pressure and velocity oscillations near the reacting zone. When choosing the frequency and amplitude ranges of the forced influence in an experimental study, it is necessary to take into account the acoustic characteristics of the flow in the laboratory unit. In some cases, for the preliminary prediction of the acoustic characteristics of the flow in a duct with a variable cross-section, special mathematical modeling is required. The problems of mathematical modeling of the spectral characteristic of natural oscillations of the gas in a laboratory unit for studying the diffusion and kinetic combustion of fuel mixtures are considered. A mathematical model developed and implemented in a specialized module makes it possible to determine the influence of geometric and mode characteristics on the resonant frequencies. The calculated and experimental data are compared. The developed mathematical model and the calculations results can be used for choosing the configuration of experimental units and predicting resonant modes with the excitation of intense oscillations of the gas velocity in the combustion zone.

Keywords: resonant frequencies, velocity oscillations, isentropic acoustic vibrations, thermal anemometer, spectral characteristics

Экспериментальное исследование горения топливных смесей можно проводить с использованием лабораторных установок, принцип действия которых основан на реализации открытого пламени в окружающем пространстве [1–4]. В частности, такие установки применяют для определения закономерностей устойчивого горения в воздушных потоках, влияния акустического, электроразрядного, электромагнитного и прочих воздействий на стабильность и интенсивность горения, а также для выполнения других исследований.

В ряде случаев эксперименты проводят при числах Дамкеллера $Da = u_{ф.п}/u_n$ ($u_{ф.п}$ — скорость распространения фронта пламени, u_n — скорость потока), незначительно превышающих единицу, когда горение происходит преимущественно в кинетическом режиме. Такие опыты очень важны для определения срывных характеристик горения, в частности уноса и проскока [5] пламени в предварительно перемешанной топливной композиции. С учетом того, что получаемые в ходе экспериментов данные могут быть использованы для исследования тонких физических процессов, требуется высокая точность моделирования заданных условий. При указанных значениях Da на результаты экспериментов существенно влияют пульсации скорости в зоне горения. Поэтому важной задачей является нахождение спектральной характеристики собственных колебаний газа в проточном тракте лабораторной установки.

Цель работы — создание математической модели для определения резонансных частот колебаний газа в лабораторных установках с проточным трактом переменного сечения и ее

валидация на примере модельной установки с двухсекционным проточным трактом.

Математическая модель. Рассмотрена лабораторная установка, проточный тракт которой (рис. 1) состоит из двух участков. Первый представляет собой осесимметричный конфузор с уменьшающейся по длине площадью поперечного сечения, второй — цилиндрический канал с площадью поперечного сечения, равной площади сечения на выходе из конфузора.

Основными геометрическими параметрами проточного тракта являются: L_1 и L_2 — длины первого и второго участков; D_1 — максимальный диаметр первого участка; D_2 — диаметр второго участка; x — продольная координата от начала первого участка.

Одной из основных акустических характеристик лабораторных установок с проточным трактом переменного сечения является спектральная характеристика собственных колебаний газа [6, 7], связывающая два каких-либо параметра во входном и выходном сечениях канала для разных значений частот возбуждающего воздействия. В данной работе рассмот-

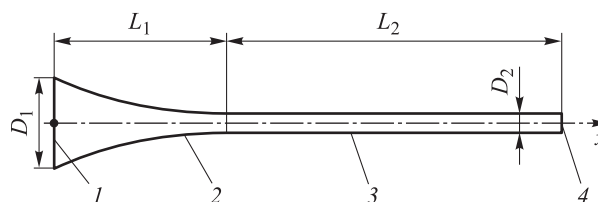


Рис. 1. Схема проточного тракта лабораторной установки:
1 и 4 — закрытый и открытый торцы; 2 — конфузор;
3 — цилиндрический канал

рена задача о влиянии импеданса (отношения акустических амплитуд давления и скорости) во входном сечении канала на импеданс и проводимость в выходном сечении канала [6–10]. В общем случае взаимосвязь импеданса ζ и проводимости η в произвольном сечении определяется соотношением $\eta = 1/\zeta$.

Такой подход обусловлен тем, что частоты, при которых на выходе из канала могут быть получены максимумы амплитуд давления, соответствуют максимумам модуля выходного импеданса, а частоты максимумов модуля выходной проводимости совпадают с максимумами амплитуд пульсаций скорости [6, 7].

Задачу определения спектральных характеристик для исследуемого проточного тракта разобьем на две части. Сначала найдем решение о распространении акустических волн в конфузоре. Параметры решения на выходе из конфузора являются начальными условиями для второй части задачи — распространения акустических волн в цилиндрическом канале.

Задачу решим при допущениях, соответствующих условиям проведения экспериментов с применением аналогичных лабораторных установок [1–5]. Примем, что изменение площади поперечного сечения F конфузора происходит по близкому к экспоненциальному закону $F(x) = F_0 \exp(2\alpha x)$, где F_0 — площадь начального сечения конфузора; α — коэффициент, учитывающий изменение площади конфузора, $\alpha = [\ln(D_1/D_2)]/L_1$. Такое изменение площади поперечного сечения конфузора позволяет использовать одномерные уравнения для решения акустической задачи.

Задача рассмотрена без учета потока в канале, так как в большинстве случаев, когда он присутствует, его число Маха в лабораторных условиях $M < 0,05$. При таких значениях числа M скорость потока незначительно влияет на распространение акустических волн. При принятых указанных допущениях система общих [8, 10] линеаризованных уравнений, описывающих распространение изоэнтропических акустических колебаний в конфузоре, принимает следующий вид:

$$v(x,t) = \bar{v} + \tilde{v}(x,t);$$

$$\rho(x,t) = \bar{\rho} + \tilde{\rho}(x,t);$$

$$p(x,t) = \bar{p} + \tilde{p}(x,t);$$

$$\tilde{p}(x,t) = c^2 \tilde{\rho}(x,t);$$

$$F(x) \frac{\partial \tilde{\rho}(x,t)}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{v}(x,t) \frac{dF(x)}{dx} + \bar{\rho} F(x) \frac{\partial \tilde{v}(x,t)}{\partial x} = 0;$$

$$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{v}(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{p}(x,t)}{\partial x} = 0,$$

где $v(x,t)$, $\rho(x,t)$ и $p(x,t)$ — функции пространственно-временного распределения скорости, плотности и давления газа в канале (t — время); $F(x)$ — площадь канала; \bar{v} , $\bar{\rho}$ и \bar{p} — средние значения скорости, плотности и давления газа в канале; $\tilde{v}(x,t)$, $\tilde{p}(x,t)$ и $\tilde{\rho}(x,t)$ — малые нестационарные возмущения скорости, давления и плотности газа; c — скорость звука.

Для произвольного изменения площади поперечного сечения конфузора система уравнений не имеет решения в квадратурах. При допущении, что площадь поперечного сечения меняется по экспоненциальному закону, и в случае гармонической зависимости параметров от времени типа $\exp(i\omega t)$ решение находится в аналитическом виде. Здесь i — мнимая единица; ω — окружная частота пульсаций, $\omega = 2\pi f$ (f — частота пульсаций).

Для анализа распространения акустических возмущений в конфузоре (на первом участке) введем следующие вспомогательные функции:

$$K = \frac{\omega}{c};$$

$$\beta_1 = i \frac{\alpha}{K} - \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{K}\right)^2};$$

$$\beta_2 = i \frac{\alpha}{K} + \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{K}\right)^2};$$

$$\gamma_1 = -\alpha + iK \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{K}\right)^2};$$

$$\gamma_2 = -\alpha - iK \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{K}\right)^2}.$$

В этом случае комплексные амплитуды пульсаций давления и скорости в конфузоре определяются соотношениями

$$\tilde{p}(x,t) = [\beta_1 A_- \exp(\gamma_1 x) + \beta_2 A_+ \exp(\gamma_2 x)] \times \exp(i\omega t); \quad (1)$$

$$\bar{c} \tilde{v}(x,t) = [A_- \exp(\gamma_1 x) + A_+ \exp(\gamma_2 x)] \times \exp(i\omega t). \quad (2)$$

Здесь A_- , A_+ — коэффициенты, характеризующие амплитуду пульсаций, соотношение которых зависит от граничных условий.

Решение уравнений (1), (2) позволяет выразить связь импедансов в сечениях на входе ζ_0 и выходе ζ_1 конфузора в виде соотношения

$$\zeta_1 = \frac{\beta_1 + \beta_2 \frac{\beta_1 - \zeta_0}{\zeta_0 - \beta_2} \exp[(\gamma_2 - \gamma_1)L_1]}{1 + \frac{\beta_1 - \zeta_0}{\zeta_0 - \beta_2} \exp[(\gamma_2 - \gamma_1)L_1]} \quad (3)$$

Для цилиндрического канала (второй участок), являющегося продолжением конфузора, вспомогательные функции преобразуются следующим образом: $\alpha = 0, \gamma_1 = iK, \gamma_2 = -iK, \beta_1 = -1, \beta_2 = 1$. С учетом этого выражения для комплексных амплитуд давления и скорости принимают более простой вид:

$$\tilde{p}(x,t) = [A_+ \exp(-iKx) - A_- \exp(iKx)] \times \exp(i\omega t); \quad (4)$$

$$\bar{\rho}c\tilde{V}(x,t) = [A_+ \exp(-iKx) + A_- \exp(iKx)] \times \exp(i\omega t). \quad (5)$$

Для цилиндрического канала значение импеданса ζ_1 в выходном сечении конфузора является начальным условием — импедансом на входе в цилиндрический канал. Выражения (3)–(5) позволяют получить соотношение, связывающее импеданс на входе ζ_1 с импедансом в выходном сечении ζ_2 цилиндрического участка:

$$\zeta_2 = \frac{1 - \frac{1 - \zeta_1}{1 + \zeta_1} \exp(2iKL_2)}{1 + \frac{1 - \zeta_1}{1 + \zeta_1} \exp(2iKL_2)}. \quad (6)$$

Таким образом, используя выражения (3), (6) и задавая значение импеданса ζ_0 в сечении на входе в конфузор, можно вычислить импеданс ζ_2 и соответствующую ему проводимость η_2 на выходе из цилиндрического канала. Зависимости импеданса ζ_2 и проводимости η_2 от частоты колебаний определяют амплитудно-частотные характеристики пульсаций скорости и давления в выходном сечении установки соответственно [11].

Для проведения вычислений с помощью разработанной математической модели создан специализированный алгоритм, реализованный в среде операционно-символьного вычисления.

Акустические характеристики лабораторной установки. Расчетные исследования акустических характеристик выполнены для проточного тракта лабораторной установки, применяемой

для изучения горения воздушно-метановых смесей [12]. Для исследования акустических характеристик лабораторная установка была адаптирована к условиям эксперимента (рис. 2).

Лабораторная установка функционирует следующим образом. Воздух подается через регулятор расхода 8 в цилиндрическую часть 4 проточного тракта, который с одной стороны связан с атмосферой, а с другой — с конфузорной частью 5 и источником акустических колебаний 6. Для возбуждения акустических колебаний с заданной частотой применен регулируемый генератор периодического сигнала 7. Для регистрации пульсаций скорости и давления в выходном сечении проточного тракта установлены термоанемометр 2 и датчик пульсаций давления 3. Для управления и сбора информации использована система 1 на базе компьютера. Геометрические характеристики проточного тракта характеризуются следующими соотношениями: $D_1/D_2 = 10, L_2/D_2 = 40$. Диаметр второго участка $D_2 = 30$ мм.

Исследования проведены при средних скоростях течения воздуха в выходном сечении канала, составляющих 0,7...10 м/с, и при акустическом воздействии с частотой 10...1000 Гц.

Следует отметить, что для определения искомым величин ζ_2 и η_2 требуется задать в качестве граничных условий значение акустического импеданса ζ_0 или акустической проводимости η_0 во входном сечении конфузора, к которому подсоединена мембрана генератора акустического воздействия. При решении настоящей задачи значение акустического импеданса ζ_0 во входном сечении конфузора было задано исходя из условия максимально полного

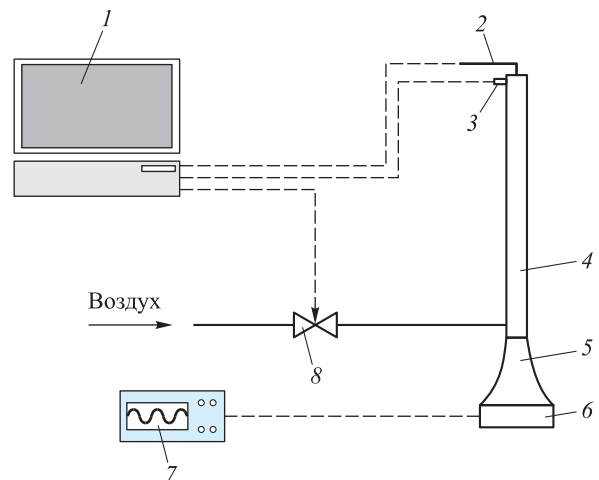


Рис. 2. Схема лабораторной установки

совпадения результатов расчета и предварительных экспериментов.

С использованием разработанной математической модели расчетными методами получены зависимости импеданса ζ_2 и проводимости η_2 от частоты акустического воздействия f (рис. 3), где значения параметров ζ_2 и η_2 представлены в относительном виде.

Полученные данные показывают, что зависимости импеданса ζ_2 и проводимости η_2 от частоты f имеют явно выраженные максимумы и минимумы. При этом максимальные значения ζ_2 совпадают по частоте с минимальными зна-

чениями η_2 . Таким образом, можно определить частоты акустического воздействия, при которых в выходном сечении лабораторной установки будет реализован максимум амплитуды пульсаций либо давления, либо скорости, что в первом случае соответствует максимуму ζ_2 , а во втором — η_2 .

Анализ результатов свидетельствует о том, что для рассматриваемой лабораторной установки частоты, при которых могут быть реализованы максимальные значения пульсаций скорости, описываются аппроксимирующим уравнением $f_\zeta = 18 + (j - 1) \cdot 92$, где $j = 1, 2, 3, \dots, N$.

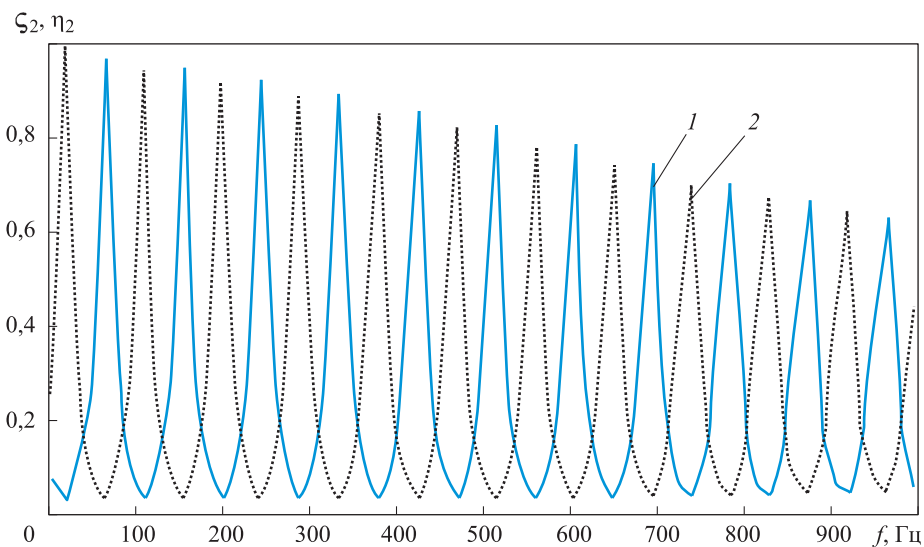


Рис. 3. Зависимость модулей импеданса ζ_2 (1) и проводимости η_2 (2) от частоты акустического воздействия f

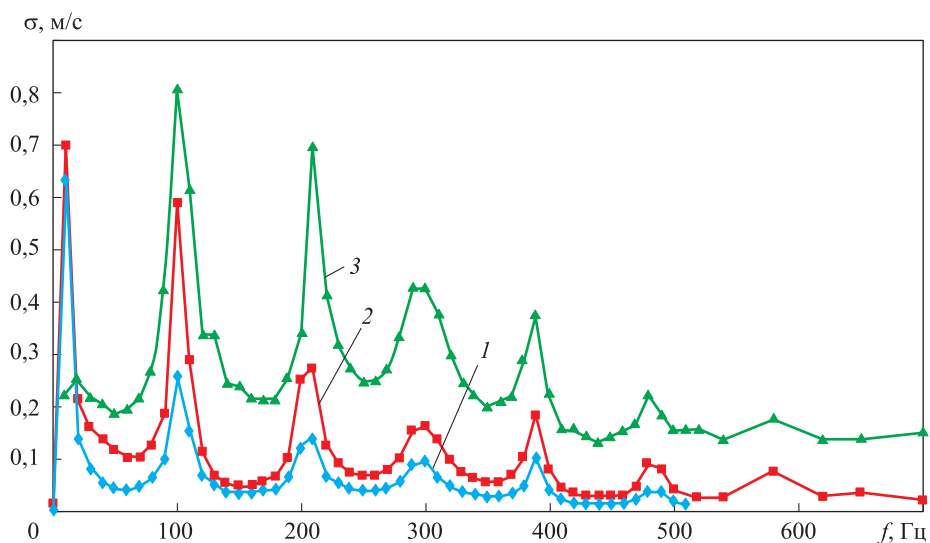


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичного отклонения пульсаций скорости в выходном сечении σ от частоты акустического воздействия f при различных значениях средней скорости потока: 1 — $u = 0,7$ м/с; 2 — $u = 2$ м/с; 3 — $u = 10$ м/с

Значения частот, соответствующих максимумам пульсаций скорости f_η и давления f_ζ

Мода j	Частота	
	f_η	f_ζ
1	18/20	64/60
2	110/100	156/160
3	202/210	248/260
4	294/300	340/350
5	386/390	432/440
6	478/480	524/520

Примечание. В числителе дроби указаны расчетные значения, в знаменателе — экспериментальные.

Частоты, соответствующие максимумам пульсаций давления, определяются выражением $f_\eta = 18 + (j - 0,5) \cdot 92$, где $j = 1, 2, 3, \dots, N$. Следует отметить, что с увеличением моды j максимальные значения ζ_2 и η_2 снижаются.

Полученные расчетные данные удовлетворительно коррелируют с результатами экспериментов. На рис. 4 приведены зависимости среднеквадратичного отклонения пульсаций скорости σ от частоты акустического воздействия, измеренные в выходном сечении проточного тракта лабораторной установки, при различных значениях средней скорости потока u [12]. Точками обозначены экспериментальные данные. Для более наглядного представления экспериментальные точки соединены кривыми. Замеры проведены с шагом по частоте 10 Гц при постоянной амплитуде сигнала, подаваемого на источник акустических колебаний. Следует отметить, что предварительно измеренные характеристики источника показали, что интенсивность акустических колебаний практически линейно зависит от амплитуды подаваемого сигнала при частотах до нескольких килогерц.

литуды подаваемого сигнала при частотах до нескольких килогерц.

Анализ результатов эксперимента свидетельствует о том, что частоты, соответствующие максимумам пульсаций скорости, практически не зависят от средней скорости потока. Это подтверждает допущения, заложенные в математическую модель в части распространения в проточном тракте акустических колебаний.

В таблице приведены расчетные и экспериментальные значения частот, соответствующих максимумам пульсаций скорости f_η и давления f_ζ .

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало, что различие в значениях f_ζ и f_η не превышает 12 %.

Выводы

1. Разработанная и реализованная в среде операционно-символьного вычисления математическая модель может быть использована для оценки акустических характеристик проточных трактов переменного сечения, в частности для расчета частот, соответствующих максимальным значениям колебаний газа в выходном сечении.

2. С использованием предложенной математической модели определены значения частот, при которых достигаются максимальные значения пульсаций скорости или давления в выходном сечении лабораторной установки. Для первой моды $f_\eta = 18$ Гц и $f_\zeta = 64$ Гц.

3. Установлено, что при средних скоростях течения воздуха в выходном сечении канала (0,7...10 м/с) и при акустическом воздействии (10...1000 Гц) различие расчетных и экспериментальных значений частот, соответствующих максимумам пульсаций скорости f_η и давления f_ζ , не превышает 12 %.

Литература

- [1] De Souza T.C., Bastiaans R.J.M., De Goeij L.P.H., Geurts B.J. Modulation of a methane Bunsen flame by upstream perturbations. *Journal of Turbulence*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 316–337.
- [2] Birbaud A.L., Durox D., Candel S. Upstream flow dynamics of a laminar premixed conical flame submitted to acoustic modulations. *Combustion and Flame*, 2006, no. 146, pp. 541–552.
- [3] Williams T.C., Shaddix Ch.R., Schefer R.W., Desgroux P. The response of buoyant laminar diffusion flames to low-frequency forcing. *Combustion and flame*, 2007, vol. 151, pp. 676–684.
- [4] Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Катасонов М.М., Шмаков А.Г., Коробейничев О.П., Грек Г.Р. Влияние акустических колебаний на диффузионное горение пропана в микроструях. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*, 2013, вып. 1(12), с. 36–41.

- [5] Krikunova A.I., Son E.E., Saveliev A.S. Premixed Conical Flame Stabilization. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 774, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/774/1/012087.
- [6] Коротеев А.С., ред. *Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование*. Москва, Машиностроение, 2008. 511 с.
- [7] Ларионов В.М., Зарипов Р.Г. *Автоколебания газа в установках с горением*. Казань, Изд-во Казан. гос. тех. ун-та, 2003. 227 с.
- [8] Яновский Л.С., ред. *Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердом топливе. Основы теории и расчета*. Москва, Академкнига, 2006. 343 с.
- [9] Андреев А.В. *Доводка камер сгорания, работающих на газообразном и жидком топливе по отношению к вибрационному горению*. Москва, Альтекс, 2003. 413 с.
- [10] Хилькевич В.Я., Яновский Л.С., Шевченко И.В. *Устойчивость рабочего процесса в газогенераторах и двигателях на твердых топливах*. Москва, Российская инженерная академия, 2000. 105 с.
- [11] Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Ильченко М.А. Расчетно-экспериментальное исследование пульсационных процессов в малогабаритных огневых подогревателях воздуха. *Физика горения и взрыва*, 2016, № 4, с. 74–81.
- [12] Арефьев К.Ю., Крикунова А.И., Панов В.С. Экспериментальное исследование горения метана в сносящем воздушном потоке при акустическом воздействии. *Тез. докл. XII Всерос. конф. молодых ученых*, 16–22 марта 2018, Новосибирск, Изд-во Параллель, 2018. 9 с.

References

- [1] De Souza T.C., Bastiaans R.J.M., De Goey L.P.H., Geurts B.J. Modulation of a methane Bunsen flame by upstream perturbations. *Journal of Turbulence*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 316–337.
- [2] Birbaud A.L., Durox D., Candel S. Upstream flow dynamics of a laminar premixed conical flame submitted to acoustic modulations. *Combustion and Flame*, 2006, no. 146, pp. 541–552.
- [3] Williams T.C., Shaddix Ch.R., Schefer R.W., Desgroux P. The response of buoyant laminar diffusion flames to low-frequency forcing. *Combustion and flame*, 2007, vol. 151, pp. 676–684.
- [4] Litvinenko Yu.A., Kozlov V.V., Katasonov M.M., Shmakov A.G., Korobeynichev O.P., Grek G.R. Vliyanie akusticheskikh kolebaniy na diffuzionnoe gorenje propana v mikrostruyah [Influence of acoustic oscillations on the diffusion combustion of propane in the micro-jet]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern science: Researches, Ideas, Results, Technologies]. 2013, is. 1(12), pp. 36–41.
- [5] Krikunova A.I., Son E.E., Saveliev A.S. Premixed Conical Flame Stabilization. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 774, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/774/1/012087.
- [6] *Rabochie protsessy v zhidkostnom raketnom dvigatele i ih modelirovanie* [Working processes in liquid-propellant rocket engine and their simulation]. Ed. Koroteev A.S. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008. 511 p.
- [7] Larionov V.M., Zaripov R.G. *Avtokolebaniya gaza v ustanovkah s gorenaniem* [Self-oscillations of gas in installations with combustion]. Kazan, KAI publ., 2003. 227 p.
- [8] *Integral'nye pryamotochnye vozdushno-reaktivnye dvigateli na tverdom toplive. Osnovy teorii i rascheta* [Integral straight-line solid-fuel air-jet engines. Fundamentals of theory and calculation]. Ed. Yanovskiy L.S. Moscow, Akademkniga publ., 2006. 343 p.
- [9] Andreev A.V. *Dovodka kamer sgoraniya, rabotayushchih na gazoobraznom i zhidkom toplive po otnosheniyu k vibratsionnomu goreniyu* [Fine-tuning of combustion chambers operating on gaseous and liquid fuels in relation to vibrational combustion]. Moscow, Al'teks publ., 2003. 413 p.
- [10] Hil'kevich V.Ya., Yanovskiy L.S., Shevchenko I.V. *Ustoychivost' rabocheho protsessa v gazogeneratorah i dvigatelyah na tverdyh toplivah* [Stability of the working process in gas generators and engines on solid fuels]. Moscow, Rossiyskaya inzhenernaya akademiya publ., 2000. 105 p.
- [11] Aleksandrov V.Yu., Aref'ev K.Yu., Il'chenko M.A. *Raschetno-ehksperimental'noe issledovanie pul'satsionnyh protsessov v malogabaritnyh ognevyyh podogrevatelyah vozduha* [Numerical and Experimental Study of Oscillatory Processes in Small-Scale Combustion

- Heaters of Air]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves]. 2016, no. 4, pp. 74–81.
- [12] Aref'ev K.Yu., Krikunova A.I., Panov V.S. Eksperimental'noe issledovanie goreniya metana v snosyashchem vozdushnom potoke pri akusticheskom vozdeystvii [Experimental investigation of methane combustion in a carrying air flow with acoustic impact]. *Tezisy dokladov 12 Vserossiyskoy konferentsii molodyh uchenykh* [Abstracts of the 12 All-Russian conference of young scientists]. 16–22 March, 2018, Novosibirsk, Parallel publ., 2018. 9 p.

Статья поступила в редакцию 07.05.2018

Информация об авторах

АРЕФЬЕВ Константин Юрьевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана; заместитель заведующего лаборатории гиперзвуковых и плазменных технологий. МФТИ; начальник отдела аэрокосмических двигателей. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: arefyev@ciam.ru).

ИЛЬЧЕНКО Михаил Александрович (Москва) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела аэрокосмических двигателей. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: 012@ciam.ru).

Information about the authors

AREFYEV Konstantin Yurievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Rocket Engine Department. Bauman Moscow State Technical University. Deputy Head, Laboratory for Hypersonic and Plasma Technologies. Moscow Institute of Physics and Technology; Head of Aerospace Engines Department. Federal State Unitary Enterprise Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2, e-mail: arefyev@ciam.ru).

ILCHENKO Mikhail Aleksandrovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Lead Researcher, Aerospace Engines Department. Federal State Unitary Enterprise Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2, e-mail: 012@ciam.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Арефьев К.Ю., Ильченко М.А. Определение акустических характеристик проточного тракта переменного сечения лабораторной установки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 9, с. 74–81, doi: 10.18698/0536-1044-2018-9-74-81.

Please cite this article in English as:

Arefyev K.Y., Ilchenko M.A. The Determination of the Flow Acoustic Characteristics in a Duct with Variable Cross-Section of a Laboratory Unit. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 9, pp. 74–81, doi: 10.18698/0536-1044-2018-9-74-81.