

Изменение частотной характеристики эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя как способ получения вибрационного горения

Экспериментальным методом получены частотные характеристики на работающем эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе при различной длине резонаторной трубы. С помощью преобразования Фурье построены акустические спектры и график взаимосвязи длины резонаторной трубы с частотными гармониками. Установлено значение длины выпускной трубы, соответствующее возникновению режима вибрационного горения, отличительной особенностью которого является возрастание амплитуды пульсаций тяги двигателя.

К.А. СИДЕНКО,
аспирант,
В.В. БИРЮК,
д-р техн. наук
(Самарский ун-т, Самара)
sidenkokirill@mail.ru

Эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель, нормальное горение, вибрационное горение, пульсирующее горение, смесеобразование, акустическая настройка

«Процесс самовозбуждения акустических колебаний газа в энергетических установках с горением известен с работ Хиггинса и Рэлея. В литературе это явление называют также вибрационным горением, неустойчивостью горения, термическим возбуждением звука, термоакустическими колебаниями, пульсационным горением» [1].

В камерах сгорания двигателей летательных аппаратов мощные колебания приводят к частичному или полному разрушению элементов конструкции, снижают надежность их работы. Вследствие интенсификации теплообмена в ряде случаев наблюдается прогорание различных частей камеры сгорания. В связи с этим обеспечение устойчивости процесса горения представляет собой актуальную научно-техническую проблему, сопряженную с существенными материальными затратами и занимающую значительную долю времени в общем цикле доводки двигателей. Вместе с тем экспериментально установлено, что газодинамические колебания способствуют повышению теплонапряженности топочного объема, интенсификации теплообмена со стенками камеры сгорания и увеличению полноты сгорания топливной смеси по сравнению со стационарным (устойчивым) режимом горения [2–6].

«Независимо от того, положительную или отрицательную роль играет вибрационное горение, все высокочастотные колебания в камере сгорания связаны со взаимодействием горения и акустических колебаний газового столба, находящегося в двигателе» [7].

В работе [8] определены источники энергии и механизмы, подводящие энергию к колебательной системе исследуемого эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя, поддерживающего акустические автоколебания газа. По результатам работы установлено, что для работающего двигателя источником автоколебаний является теплоподвод. Максимальный уровень акустической энергии генерируется именно в процессе горения.

Известно [7], что при возникновении автоколебаний, инициируемых процессом горения, наличие обратной связи обуславливает воздействие акустических колебаний на сам процесс горения. Следовательно, необходимо исследовать влияние акустических колебаний на процесс горения в пульсирующем воздушно-реактивном двигателе. В данном случае резонансную частоту будем изменять длиной выпускной трубы.

Для проведения исследования предлагается экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Здесь: 1 – воздушный компрессор; 2 – осушитель воздуха; 3 – ресивер; 4 – регулятор давления; 5 – электромагнитные клапаны; 6 – сопла; 7 – вентилятор; 8 – смеситель; 9 – эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель; 10 – датчик звукового давления; 11 – регистратор данных; 12 – персональный компьютер.

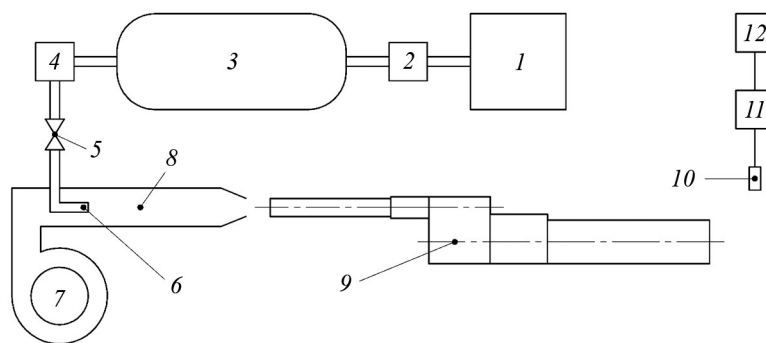


Рис. 1

Испытания проводились в условиях наддува в первый смеситель при включении центробежного вентилятора высокого давления. При скорости набегающего воздушного потока 60 м/с двигатель прогревается 15–20 с от пусковой форсунки. При достижении температуры топлива 300–400 °С ступенчато, поочередно включаются пять электромагнитных клапанов, подающих сжатый воздух из ресивера для достижения требуемого расхода воздуха с одновременным увеличением подачи топлива в двигатель. Около выпускной трубы располагается датчик звукового давления, сигнал с которого записывается регистратором данных и далее передается на персональный компьютер. С помощью весового тензодатчика регистрировались пульсации силы тяги, создаваемой исследуемым двигателем.

Цель данной работы состоит в определении влияния положения зоны горения на частотные характеристики в эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе с целью получения вибрационного горения.

В работе [9] показано влияние акустической настройки на режим работы эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя. При уменьшении длины выпускной трубы (резонатора) до 1380 мм наблюдается уменьшение размаха значений силы тяги на осциллограмме, представленной на рис. 2. Здесь: 1 – давление в топливном коллекторе; 2 – давление во второй впускной трубе; 3 – средневывпрямленное значение давления во второй впускной трубе; 4 – сила тяги.

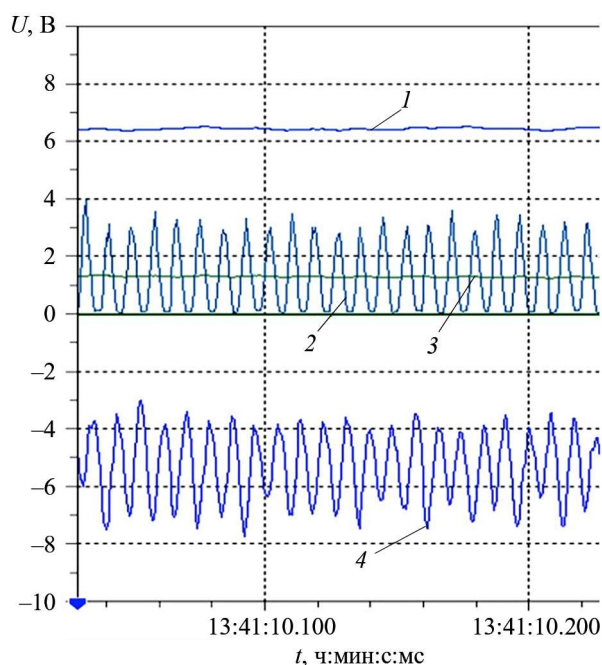


Рис. 2

На последующем этапе были зарегистрированы частотные характеристики и выполнено быстрое преобразование Фурье (рис. 3) при скорости набегающего потока воздуха 60 м/с.

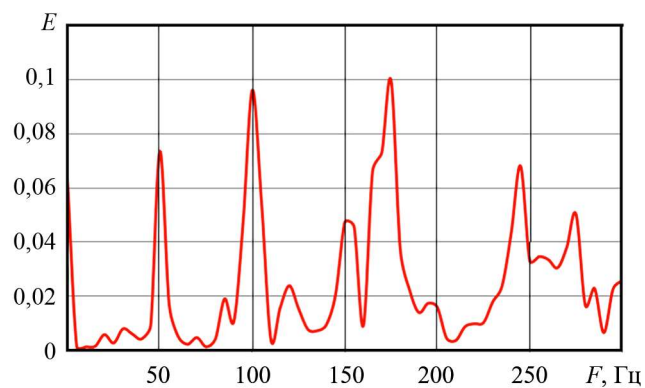


Рис. 3

На рис. 4 показана осциллограмма, полученная при длине резонаторной трубы 1400 мм. Здесь: 1 – давление в топливном коллекторе; 2 – давление во второй впускной трубе; 3 – средневывпрямленное значение давления во второй впускной трубе; 4 – сила тяги.

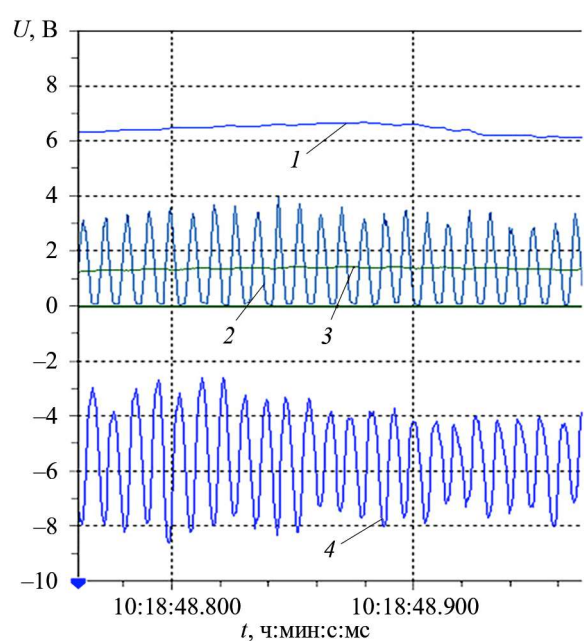


Рис. 4

Далее были получены частотные характеристики при длине резонаторной трубы 1400 мм и выполнено быстрое преобразование Фурье, что демонстрирует рис. 5. Здесь: 1 – скорость набегающего потока воздуха – 60 м/с; 2 – скорость набегающего потока воздуха – 260 м/с.

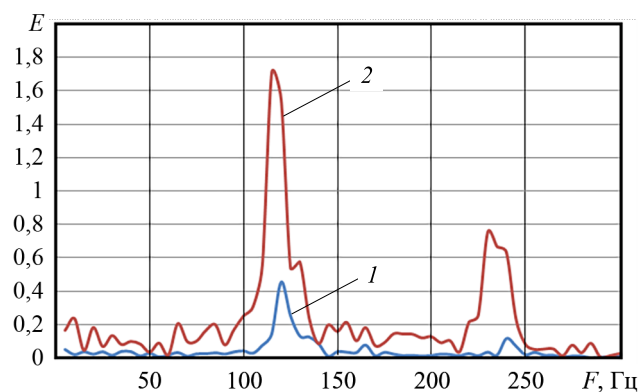


Рис. 5

При увеличении выпускной трубы до величины 1400 мм возникает вибрационное горение, для которого характерно увеличение размаха значений силы тяги двигателя (см. рис. 4).

По акустическим спектрам на работающем двигателе был построен график зависимости частоты работающего двигателя от длины резонаторной трубы (рис. 6).

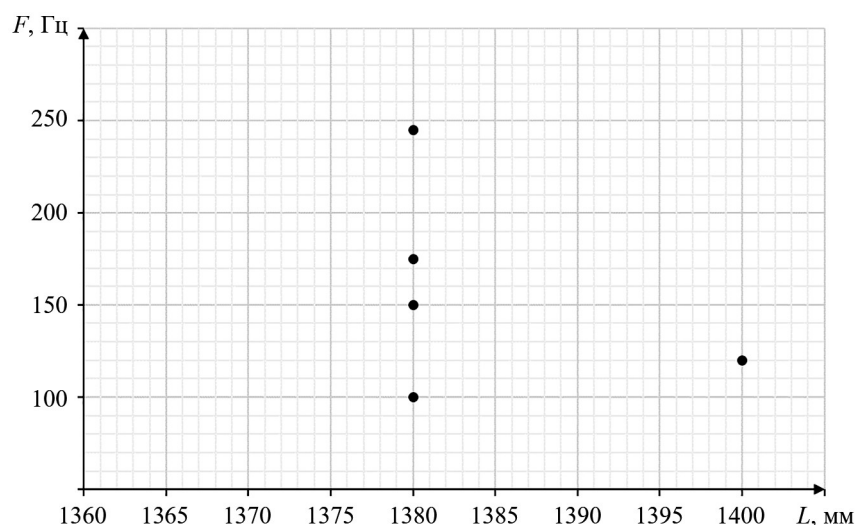


Рис. 6

Как видно (см. рис. 6), при уменьшении длины резонаторной трубы до 1380 мм кроме основной частоты 100 Гц появляются гармоники с частотой 150, 175, 245 Гц.

Установлено, что увеличение номера гармоники приводит к росту числа чередующихся участков устойчивости и неустойчивости, размещающихся вдоль длины трубы. В частности, первая гармоника соответствует одной области неустойчивости, вторая – двум, третья – трем. Кроме того, возможно одновременное проявление неустойчивости для нескольких гармоник.

«Известно, что с увеличением частоты колебаний количество энергии, излучаемой из трубы в окружающее пространство, резко возрастает. По мере удаления зоны горения от открытого конца первоначально стабильный процесс должен стать неустойчивым, причем частота колебаний скачкообразно понижаться до основного тона системы. Это приведет, казалось бы, к парадоксальному поведению колебательной системы: увеличение относительной длины участка трубы, заполненного горячим газом, будет приводить к уменьшению частоты колебаний, в то время как все гармоники должны были бы увеличивать свойственные им частоты. С увеличением длины резонаторной трубы гармоники увеличиваются, по мере этого возрастания становятся неустойчивыми все более и более низкие гармоники, которые, рассеивая меньше энергии во внешнее пространство, будут возбуждаться легче, чем высокие гармоники, и смогут подавлять последние» [7]. Области неустойчивости, представленные на рис. 6, расположены таким образом, что при определенных относительных значениях длины горячей части течения возможно одновременное возникновение неустойчивости по нескольким гармоникам. В результате происходит их одновременное возбуждение.

Приведем осциллограмму акустических колебаний работающего эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя с длиной резонаторной трубы 1380 мм (рис. 7, а) и ее вейвлет-преобразование (рис. 7, б). Наблюдается множество гармоник в диапазоне 100...250 Гц.

Приведем осциллограмму акустических колебаний работающего эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя с длиной резонаторной трубы 1400 мм (рис. 8, а) и ее вейвлет-преобразование (рис. 8, б). С увеличением длины резонаторной трубы до 1400 мм количество гармоник уменьшилось.

Ранее наблюдавшиеся турбулентные пульсации подавляются на фоне выраженных колебаний акустической природы, при которых поток газа колеблется как единая система.

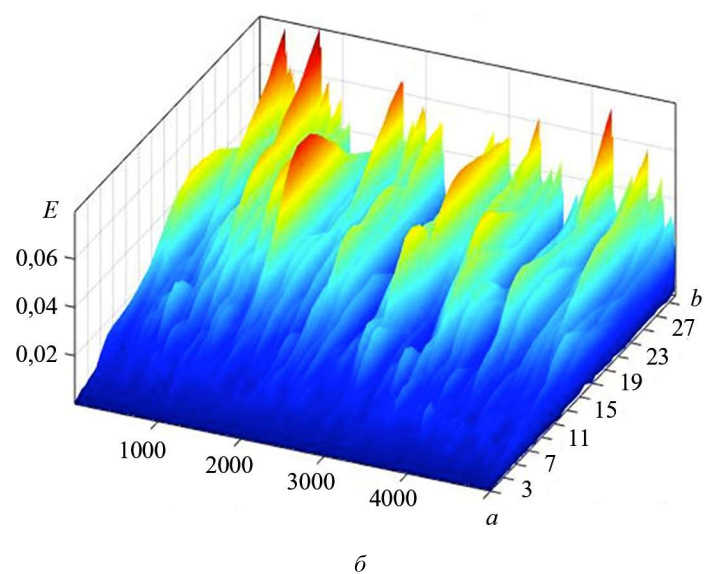
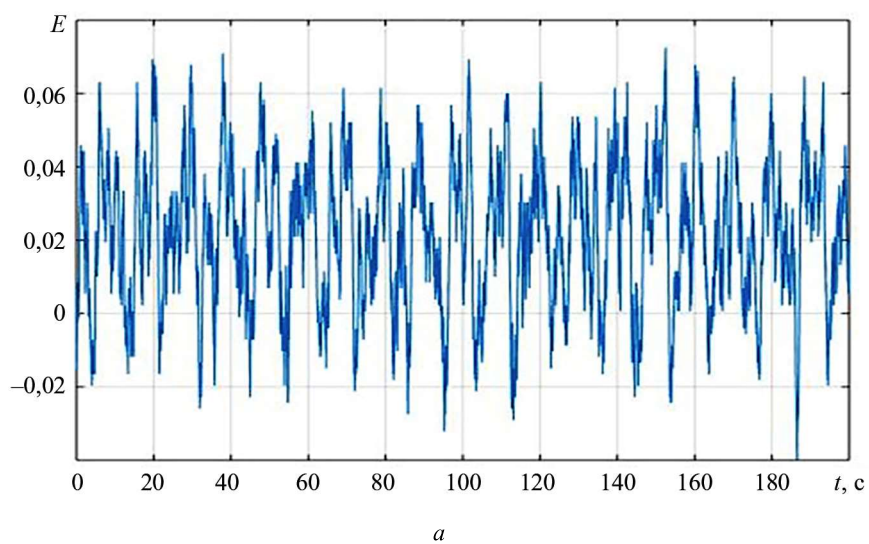


Рис. 7

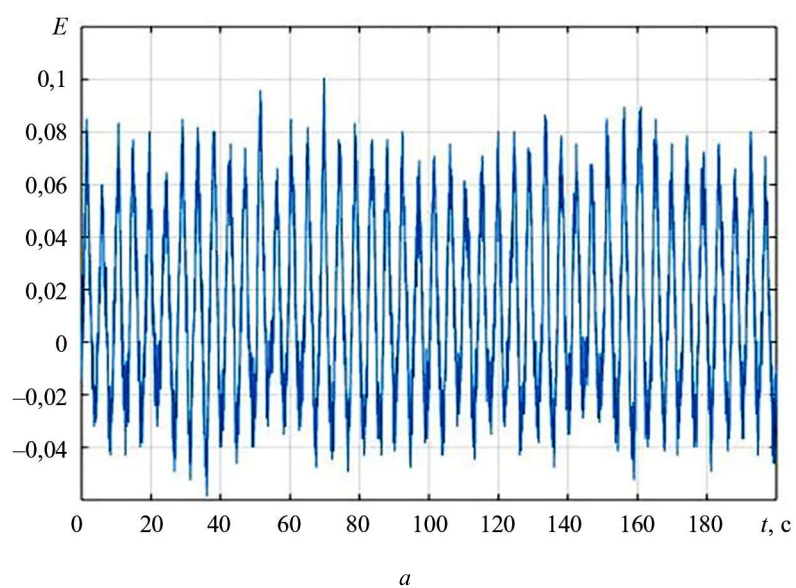


Рис. 8 (Начало)

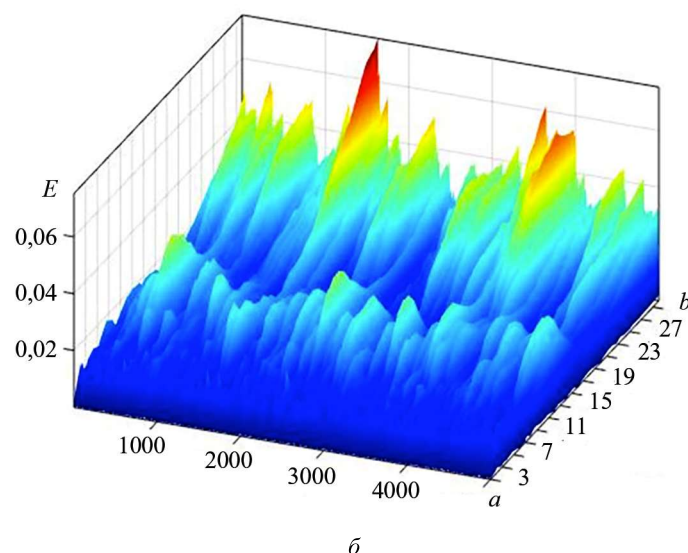


Рис. 8 (Окончание)

Вибрационное горение представляет собой разновидность неустойчивого горения, характеризующуюся возникновением автоколебаний газа в камере сгорания. Данный режим обусловлен чувствительностью процессов смесеобразования, вихреобразования и горения к колебаниям газовой среды в камере.

«Возникновение автоколебательного периодического горения связывается со спецификой протекания составляющих цикл элементарных процессов, влияющих на работу двигателя и зависящих от его конструктивных параметров» [10].

Источниками энергии автоколебаний служат тепловая и кинетическая энергия топлива и воздуха, поступающих в камеру.

Автоколебания имеют четкую периодичность. Частота высокочастотных колебаний близка к одной из собственных частот звуковых колебаний газа в камере. Под низкочастотными колебаниями понимают несколько низших форм собственно продольных колебаний газа. «Автоколебания возбуждаются, когда колебания скорости тепловыделения и приращения массы газа при горении жидкого топлива совершаются с частотой колебаний давления газа и имеют фазовый сдвиг относительно них $< \pi / 2$ » [8]. Вибрационное горение сопровождается резким увеличением шума, срывами пламени и разрушением камеры сгорания. При установившемся режиме вибрационного горения амплитуда и период колебаний потока приобретают постоянные значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларионов В.М., Заринов Р.Г. Автоколебания газа в установках с горением. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 227 с.
2. Higgins B. On the Sound Produced by a Current of Hydrogen Gas Passing through a Tube // Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts. 1802. Vol. 1. P. 129–131.
3. Рогинский О.Г. О вибрационном горении // Акустический журнал. 1961. № 2. С. 131–154.
4. Неустойчивость горения в ЖРД / Под ред. Д.Т. Харье, Ф.Г. Рирдона. М.: Мир, 1975. 869 с.
5. Rott N. Thermoacoustics // Advanced in Applied Mechanics. 1980. Vol. 20. P. 135–175.
6. Беляев Н.М., Белик Н.П., Польшин А.В. Термоакустические колебания газожидкостных потоков в сложных трубопроводах энергетических установок. Киев: Вища школа, 1985. 160 с.
7. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. М.: Физматгиз, 1961. 500 с.
8. Сиденко К.А. Источники автоколебаний в эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 112–119.
9. Сиденко К.А., Бирюк В.В. Влияние коэффициента избытка воздуха и акустической настройки на рабочий процесс эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя // Изв. вузов. Авиационная техника. 2025. № 2. С. 222–226.

10. *Побежимов В.Н.* Моделирование рабочего процесса пульсирующего ВРД с аэродинамическим клапаном на основе анализа термодинамического цикла // Изв. вузов. Авиационная техника. 2007. № 1. С. 46–48.

Поступила в редакцию 10.10.25

После доработки 27.11.25

Принята к публикации 27.11.25

Changing the Frequency Response of an Ejector Pulse Jet Engine as a Method for Obtaining Vibratory Combustion

K.A. SIDENKO AND V.V. BIRYUK

Samara University, Samara

Frequency characteristics of a running ejector pulse jet engine were experimentally obtained with various resonator tube lengths. Using a Fourier transform, acoustic spectra and a graph of the relationship between resonator tube length and frequency harmonics were constructed. The exhaust tube length corresponding to the onset of vibratory combustion, characterized by an increase in the amplitude of engine thrust pulsations, was determined.

Ejector pulse jet engine, normal combustion, vibratory combustion, pulsating combustion, mixture formation, acoustic tuning.