

СНИЖЕНИЕ ШУМА БЛОЧНОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ С ПОМОЩЬЮ ВПРЫСКА ВОДЫ

В. Л. Бакулев^{1,2}, А. М. Воробьев^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

² ОАО «Конструкторское бюро специального машиностроения» («КБСМ»),
Российская Федерация, 194100, Санкт-Петербург, Лесной пр., 64

В работе экспериментально исследуются особенности акустического поля блочной сверхзвуковой струи и влияние впрыска воды в слой смешения струи на интенсивность акустического излучения. Экспериментальная установка состоит из пятисоплового твердотопливного двигателя, закрепленного в горизонтальном положении, и кольцевого коллектора, который обеспечивает впрыск воды в слой смешения струи. Установлено, что процесс догорания топлива способен провоцировать дискретный тон большой амплитуды. Проведенный вейвлет-анализ показал зависимость частоты этого дискретного тона от давления внутри камеры сгорания. Установлено, что впрыск воды под углом 60° относительно оси струи полностью устраняет дискретный тон. Библиогр. 12 назв. Ил. 6.

Ключевые слова: шум сверхзвуковой струи, снижение шума, впрыск воды, вейвлет-анализ.

1. Введение. В настоящее время проблема снижения акустического воздействия на ракетно-космический носитель (РКН) является одной из главных проблем пилотируемых полетов. Задачи по изучению космоса требуют постоянного увеличения мощности РКН, а рост мощности приводит к увеличению аэродинамического шума, который играет ключевую роль на стартовой площадке.

При старте РКН газовые струи двигательной установки, взаимодействуя друг с другом и с элементами конструкции стартового сооружения, приводят к формированию мощных акустических полей, в результате чего РКН испытывают сильные виброакустические напряжения. Снижение виброакустических нагрузок может быть реализовано путем применения систем защиты от акустического воздействия в виде изоляционных материалов, но это решение не является оптимальным, так как влечет за собой увеличение массы головного отсека, в котором находятся космонавты и аппаратура. Поэтому оптимальным решением этой задачи признано сочетание двух направлений: снижение интенсивности акустических полей в области работающих двигательных установок и использование локальной акустической защиты в области головного отсека. В данной статье рассматривается проблема подавления акустических полей в области работающей двигательной установки, а именно снижение шума сверхзвуковой струи.

Сверхзвуковая неизобарическая неизотермическая струя является очень сложным источником шума. Экспериментальные исследования и немногочисленные теоретические расчеты показали наличие трех механизмов генерации шума [1]. Первый источник шума — это шум смешения, образующийся в результате взаимодействия вихрей, возникающих при смешении струи с окружающей средой. Этот источник шума можно условно разделить на шум крупномасштабных и мелкомасштабных турбулентных структур. Если конвективная скорость вихрей превышает скорость звука в окружающем пространстве, то происходит излучение волн Маха, которое является вторым источником шума. Третий источник шума называют ударным. Он характерен для нерасчетных струй и разделяется на широкополосную и дискретную состав-

ляющие. Широкополосная составляющая связана с взаимодействием конфигурации скачков уплотнения с вихревыми структурами слоя смешения. Дискретная составляющая обусловлена тем, что система скачков уплотнения нерасчетной струи при некоторых режимах не сохраняется неподвижной и происходит автоколебательная раскачка струи [2].

В экспериментальном направлении за последнее время все большее значение приобретают вопросы снижения акустического излучения высокоскоростных реактивных струй с помощью впрыска воды. На эффективность снижения шума при инъекции воды влияют многочисленные параметры. Они включают в себя отношение массового расхода воды к расходу газа, осевое расположение инъекции воды, угол инъекции воды, число инжекторов и метод инъекции (сплошная струя или распыленная), размеры капель, давление и температуру воды. В работах [3, 4] проведены серии экспериментальных исследований по влиянию впрыска воды в сверхзвуковую струю твердотопливного ракетного двигателя. В результате было получено, что начиная с некоторого значения давления подачи воды, относительный расход слабо влияет на величину снижения. При этом наибольшую эффективность имеет впрыск в непосредственной близости к выходному сечению сопла под углом 45° – 60° . Подобные результаты получены в работах [5, 6].

2. Постановка задачи и экспериментальная установка. Целью данного исследования является определение особенностей акустического поля сверхзвуковой струи пятисоплового твердотопливного двигателя, а также исследование влияния впрыска воды в слой смешения струи. Для этого на испытательной станции ОАО «КБСМ» был разработан стенд, схема которого представлена на рис. 1.

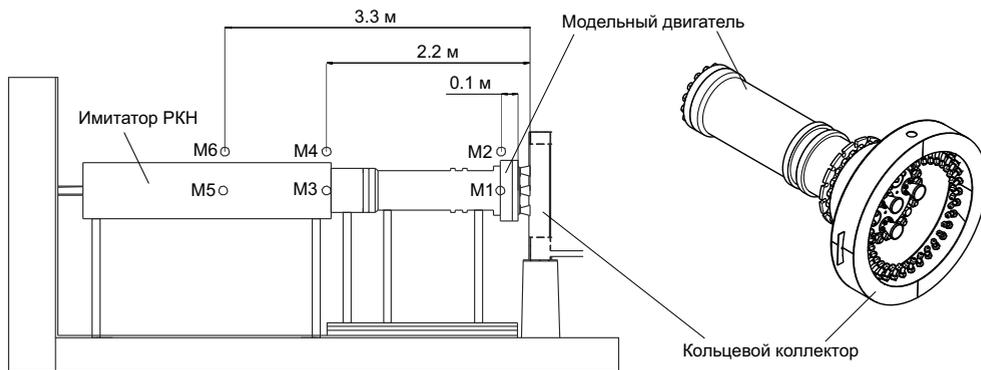


Рис. 1. Экспериментальная установка.

Экспериментальная установка состоит из твердотопливного ракетного двигателя (РДТТ) с имитатором корпуса РКН, закрепленных в горизонтальном положении, и кольцевого коллектора, который обеспечивает впрыск воды в слой смешения струй. РДТТ состоит из пяти одинаковых конических сопел с углом полураствора 15° , диаметром критических сечений $D_* = 16.9$ мм и диаметром выходных сечений $D_a = 84.1$ мм. Геометрическое число Маха $M_a = 4.0$. Температура в камере сгорания $T_0 = 2740$ К. Среднее значение показателя адиабаты внутри двигателя $\gamma = 1.24$, а среднее значение газовой постоянной $R = 311$ Дж/(кг с). Кольцевой коллектор состоит из 36 съемных форсунок, которые позволяют впрыскивать воду под углами 0° и 60° относительно оси струи. Расстояние от среза сопла до коллектора фиксировано и

равно 84 мм. Для исключения влияния отражающих поверхностей на результаты измерений на стенде проведена шумоизоляция упорной стены и основания, на котором крепится модельный двигатель.

На модели РКН установлено 3 пояса измерений: нижний — в районе днища двигательной установки (М1 и М2 на рис. 1), средний — на расстоянии 2.2 м от среза сопел (М3 и М4 на рис. 1) и верхний — на расстоянии 3.3 м от среза сопел (М5 и М6 на рис. 1). В каждом поясе измерений микрофоны расположены в двух взаимоперпендикулярных плоскостях — вертикальной и горизонтальной. Для измерения акустических давлений в качестве чувствительного элемента применялись 1/4-дюймовые конденсаторные микрофоны 4939А и 4938А фирмы Bruel & Kjaer (Дания). Акустические данные записывались с частотой дискретизации 131072 Гц. Для настройки и сквозной калибровки трактов акустических давлений использовался пистонфон 4228 фирмы Bruel & Kjaer. Киносъемка испытаний производилась скоростной видеокамерой с частотой 2000 кадров в секунду.

3. Результаты. Всего было проведено 4 испытания. Первые два испытания проведены без подачи воды для получения базовых уровней пульсаций давления свободной струи, причем первое испытание проводилось без кольцевого коллектора, а второе — с ним. В остальных испытаниях исследовалось влияние угла впрыска воды. В третьем испытании угол — 0° (параллельно оси струи), а в четвертом — 60° с избыточным давлением 7 атм и общим расходом воды 30 л/с. Параметры водоподачи были выбраны главным образом на основании работ [3, 4].

3.1. Давление в камере сгорания. Графики изменения давления внутри камеры сгорания РДТТ представлены на рис. 2. Для таких давлений скорость истечения газа для сопел с $M_a = 4.0$ меняется очень слабо. Согласно [2] представленная струя является высокотемпературной ($T_0 > 1000$ К) и высокоскоростной ($v_j/c_0 > 3.5$, где v_j — скорость истечения струи, c_0 — скорость звука во внешней среде) и, соответственно, можно пренебречь излучением волн Маха и широкополосным ударным шумом. Таким образом, основными шумами являются турбулентный и возможные дискретные составляющие. Мощность турбулентного шума высокоскоростной сверхзвуковой струи пропорциональна v_j^3 [7]. Можно сделать вывод, что, несмотря на некоторое несоответствие давлений между испытаниями, расхождение мощностей акустического излучения для каждого из испытаний не приводит к значительным погрешностям интенсивности акустического излучения.

Основной особенностью работы двигателя в проведенных испытаниях является то, что при достижении максимума давления в камере сгорания начинает происходить процесс интенсивного догорания топлива, т.е. частицы топлива, которые не сгорели в камере сгорания, выносятся потоком выхлопных газов из двигателя и активно перемешиваются с воздухом. По достижении необходимого соотношения топлива и воздуха (окислителя), а также нужной температуры, происходит возгорание и в струе образуется огненный факел.

Также важно отметить, что давление в камере сгорания не является постоянной величиной, а значит и расход газа не является постоянным и меняется в диапазоне $10 \div 17$ кг/с. Таким образом, в испытаниях с впрыском воды отношение расхода воды к расходу газа лежит в диапазоне $1.8 \div 3.0$.

3.2. Уровень шума. Главная проблема в анализе акустических данных представленных экспериментов заключается в том, что давление внутри камеры сгорания не стационарно, т.е. акустическое поле постоянно меняется. Для оценки уровня шу-

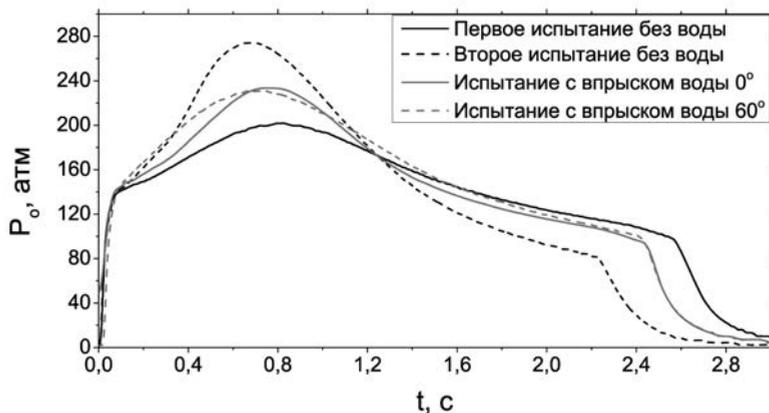


Рис. 2. Давление в камере сгорания.

ма разделим акустический сигнал на участки по 512 измерений в каждом, причем для уменьшения погрешности сделаем это с перехлестом, равным 256 измерений, т. е. на каждом следующем участке будет содержаться половина измерений предыдущего участка. Далее с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) с использованием весового окна Хеннинга для снижения погрешности находим общий уровень звукового давления на каждом участке. Результаты для микрофона с головной части модели РКН (М6 на рис. 1) представлены на рис. 3. Уровень звукового давления выражен в децибелах по формуле $L = 20 \lg(p/p_0)$, где p — акустическое давление, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Процесс излучения акустических волн можно условно разделить на два периода: первый — с момента старта и до достижения максимума давления в камере сгорания, второй — с достижения максимума давления до прекращения работы. На первом участке происходит плавное увеличение скорости истечения и, соответственно, плавное увеличение уровня звукового давления. Для испытаний без воды (рис. 3а и 3б) видим, что несмотря на разницу в давлениях, значения уровня шума отличаются между собой на 1–2 дБ, как и обсуждалось ранее. Стоит отметить, что значения давлений внутри двигателя для испытаний с подачей воды лежат между значениями давлений «сухих» испытаний, поэтому для конечной оценки эффективности водоподачи достаточно использовать среднее значение между первым и вторым испытаниями без воды. На втором участке происходит интенсивное догорание топлива, что приводит к резкому и значительному увеличению уровня шума.

3.3. Спектральный анализ. Для детального анализа акустического поля и выявления источников шума необходимо провести спектральный анализ, однако возникает сложность, связанная с тем, что акустический сигнал постоянно меняется со временем. Традиционный анализ Фурье здесь не пригоден, так как не будет отображать динамику процесса, а его оконная модификация будет иметь очень большую погрешность. С подобными проблемами лучше всего справляется вейвлет-преобразование, которое нашло широкое применение в анализе динамических систем. В отличие от преобразования Фурье, которое локализует сигнал только по частотам, вейвлет-преобразование способно локализовать сигнал одновременно и по частотам, и по времени. Таким образом, появляется возможность определить, какая частота имеется в сигнале и в какой момент времени.

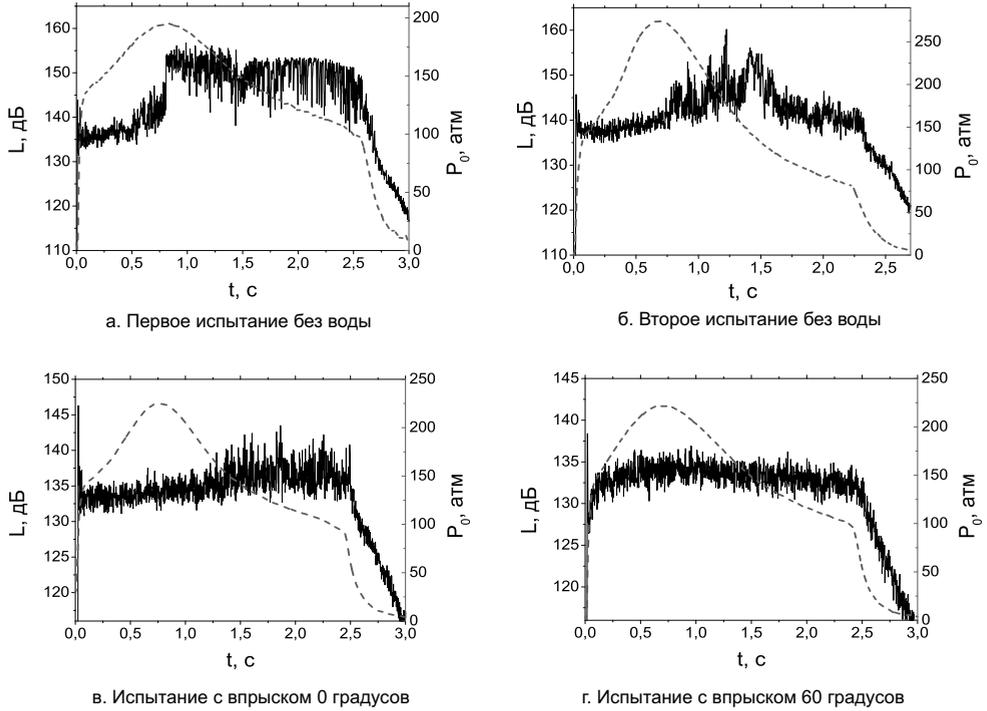


Рис. 3. Зависимость общего уровня шума в верхнем поясе измерений (сплошная линия) и давления в камере сгорания (штриховая линия) от времени.

Непрерывное вейвлет-преобразование осуществляется путем свертки

$$W(s, t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{s,t_0}^*(t) dt \quad (1)$$

анализируемой функции $f(t)$ с двухпараметрической вейвлетной функцией $\psi_{s,t_0}(t)$, которая получается из материнского вейвлета $\psi_0(t)$:

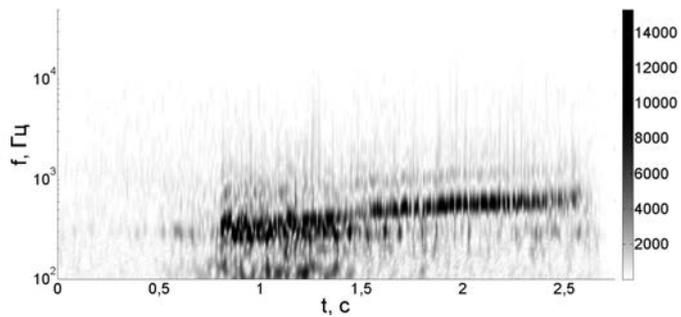
$$\psi_{s,t_0}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}\psi_0\left(\frac{t-t_0}{s}\right). \quad (2)$$

Параметр $s > 0$, называемый масштабом вейвлетного преобразования, отвечает за ширину вейвлета, а t_0 — параметр сдвига, определяющий положение вейвлета по оси t [8]. Здесь ψ^* — комплексное сопряжение ψ . В представленном исследовании будем использовать морлет-вейвлет, материнский вейвлет которого имеет вид

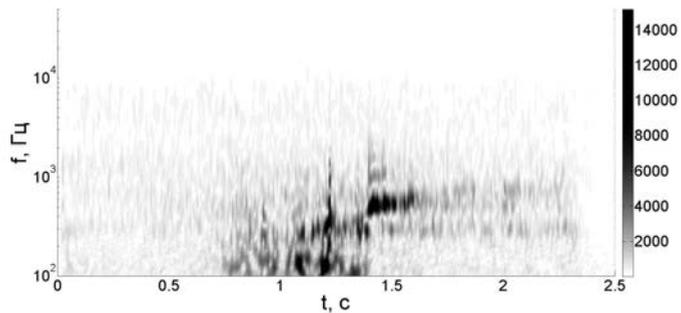
$$\psi_0(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}e^{2\pi i\eta}e^{-\eta^2}. \quad (3)$$

Для данного вейвлета масштаб s и частота f связаны соотношением $s \cdot f \approx F_s$, где F_s — частота дискретизации сигнала; в нашем случае $F_s = 131072$ Гц.

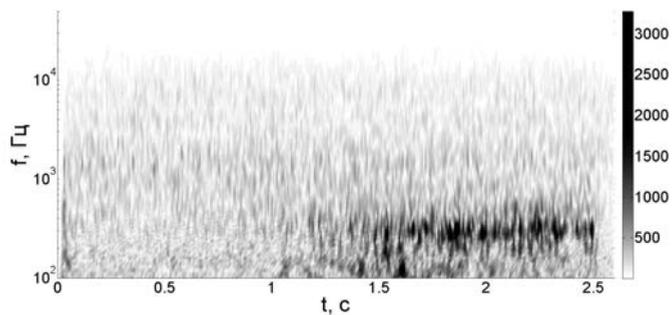
На рис. 4,а–б представлены модули вейвлет-преобразования $|W(f, t)|$ сигналов с верхнего пояса измерений (М6 на рис. 1) для «сухих» испытаний. Из этих графиков видно, что когда в струе начинается догорание топлива, в спектре



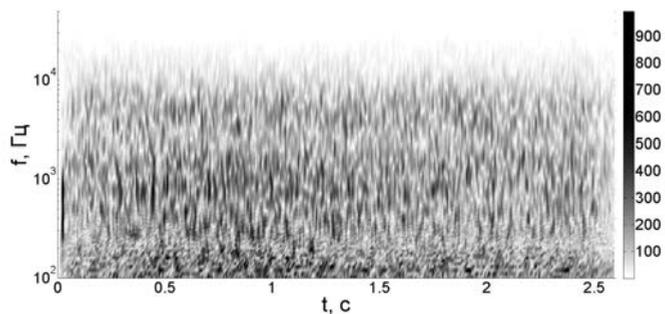
а. Первое испытание без воды



б. Второе испытание без воды



в. Испытание с впрыском 0 градусов



г. Испытание с впрыском 60 градусов

Рис. 4. Модуль вейвлет-преобразования сигнала $|W(f, t)|$.

акустического излучения появляется дискретная составляющая с очень большой амплитудой.

Еще одна особенность этой дискретной составляющей заключается в том, что по мере уменьшения давления в камере сгорания частота увеличивается. Также стоит отметить, что в момент $t = 1.3$ с, когда давления в камере сгорания для этих испытаний равны, частоты дискретных тонов также равны. На рис. 4,б-г представлены модули вейвлет-преобразования сигналов с этого же пояса измерений для испытаний с впрыском воды. Видно, что впрыск воды под углом 60° полностью убирает дискретный тон, тогда как впрыск параллельно оси струи убирает только частично, хотя значительно уменьшает его амплитуду.

3.4. Модель генерации дискретного тона. Генерацию дискретного тона впервые исследовал Пауэлл [9]. Он описал резонансную петлю автоколебаний и вывел соотношение для частоты дискретного тона, которое в приближенной упрощенной форме имеет вид

$$\frac{1}{f} = L \left(\frac{1}{v_c} + \frac{1}{c_0} \right), \quad (4)$$

где L — длина первой бочки сверхзвуковой струи, v_c — конвективная скорость переноса вихрей, c_0 — скорость звука в окружающем пространстве. Возмущения, которые появляются вследствие развития гидродинамической неустойчивости Кельвина—Гельмгольца на границе струи у выходного сечения, сворачиваются в вихри и распространяются по потоку с конвективной скоростью v_c . Эти вихри, дойдя до скачка уплотнения в конце первой бочки, имеющей длину L , генерируют акустическую волну, которая распространяется к выходному сечению сопла и усиливает начальные возмущения на границе струи. Так резонансную петлю автоколебаний описал Пауэлл. При нерасчетном истечении дискретная составляющая появляется не всегда. На возникновение влияет множество факторов: внешний поток, температура струи, конденсированная фаза в струе и т. д. [2]. Такие дискретные тона, вызванные нерасчетным режимом истечения, наблюдаются и в представленных экспериментах, однако они имеют малую продолжительность и амплитуду. Резонансная петля, описывающая генерацию основного дискретного тона, связана с догоранием топлива и имеет несколько другой вид. Во-первых, усиление начальных возмущений на границе струи происходит из-за наличия в потоке твердых частиц топлива, которые очень сильно влияют на развитие неустойчивости. Во-вторых, именно благодаря развитию этой неустойчивости возмущения сильнее сворачиваются в вихри, в которых собственно и происходит перемешивание струи, состоящей из выхлопных газов и частиц топлива, с воздухом. Эти вихри также движутся с конвективной скоростью v_c , со временем увеличиваются и вследствие торможения нагреваются. По достижении определенной концентрации частиц топлива и воздуха (окислителя), а также нужной температуры, происходит воспламенение с выделением большого объема выхлопных газов. И в третьих, с гидродинамической точки зрения фронт пламени рассматривается как скачок плотности [12]. Поэтому, когда происходит воспламенение топлива, генерируется сильная акустическая волна. Этим объясняется столь большая амплитуда дискретного тона. Далее эта волна доходит до выходного сечения сопла и резонансная петля замыкается. Таким образом, если в формуле Пауэлла в качестве L взять расстояние, на котором происходит воспламенение, то получим соотношение для частоты дискретного тона в нашем случае.

Для описания шума нерасчетной струи обычно вводят число Маха эквивалентной струи M_j , которое соответствует числу Маха расчетной струи при изоэнтропическом расширении струи от P_0 (давление в камере сгорания) до P_a (статическое давление в окружающей среде) и находится из соотношения

$$\pi(M_j) = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_j^2\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = \frac{P_a}{P_0}. \quad (5)$$

В нашем случае $P_a = 1$ атм. Зона интенсивных химических реакций проявляется свечением — химической люминесценцией [12], которую можно наблюдать на кинолентке. Из анализа этих видеозаписей можно сделать вывод, что воспламенение происходит на расстоянии $(2 \div 3) \cdot L_1$, где L_1 — длина первой бочки струи. В связи с этим положим $L = 2.5L_1$. Для оценки L_1 воспользуемся формулой Пэка [11]:

$$\frac{L_1}{D_j} = 1.22 \sqrt{M_j^2 - 1}, \quad (6)$$

где D_j — диаметр эквивалентной струи. Далее, если выразить D_j через диаметр критического сечения D_* , получим [10]

$$\frac{L_1}{D_*} = 1.22 \sqrt{M_j^2 - 1} \sqrt{M_j (1 + \varepsilon (M_j^2 - 1))^{-\frac{1}{2\varepsilon}}}, \quad (7)$$

где $\varepsilon = (\gamma - 1)/(\gamma + 1)$. Скорость звука в окружающей среде (c_0) равна 330 м/с и постоянна. Для оценки конвективной скорости v_c воспользуемся оценкой $v_c/v_j = 0.7$ [10], а v_j определим по формуле

$$v_j = M_j a_j = M_j \sqrt{\gamma R \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_j^2\right)^{-1}} T_0. \quad (8)$$

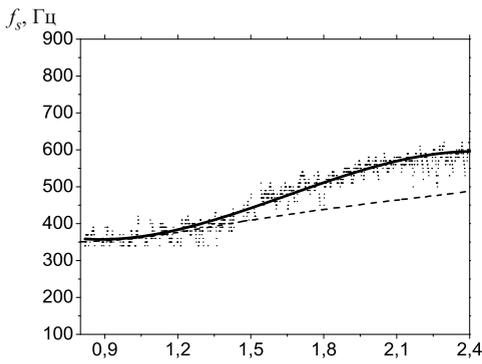
На рис. 5 представлены результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными. Видим, что несмотря на серьезные допущения, модель хорошо описывает динамику процесса. Основное отличие в том, что в эксперименте увеличение частоты дискретного тона происходит быстрее, чем в модели.

3.5. Влияние впрыска воды. Из вышеописанного следует, что в каждом из испытаний работу двигателя можно разделить на два периода: до максимума давления в камере сгорания (догорания топлива нет) и после (с догоранием). Для понимания влияния воды на акустическое поле построим для каждого участка распределение энергий по частотам по формуле

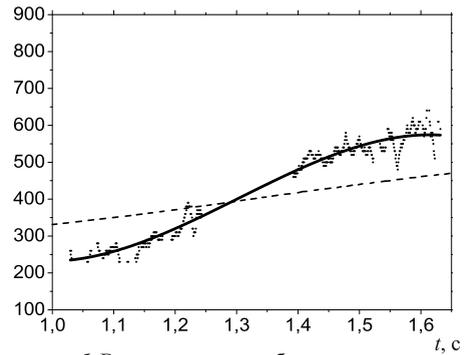
$$\langle E(f) \rangle = \frac{1}{N_{\Delta t}} \sum_{t=t_1}^{t_2} |W(f, t)|^2, \quad (9)$$

где t_1 и t_2 — начало и конец временного интервала, $N_{\Delta t}$ — количество измерений на интервале (t_1, t_2) . Результаты представлены на рис. 6.

Из представленных графиков видно, что в работе двигателя с догоранием энергии гармоник в полосе частот 0.1 — 2 кГц увеличивается на порядок, тогда как в полосе 2 — 50 кГц энергии практически совпадают. На первом участке в полосе частот 0.1 — 5 кГц влияние подачи воды под различными углами практически одинаково, тогда как в полосе 5 — 50 кГц впрыск под углом 60° эффективней. Это связано с тем,

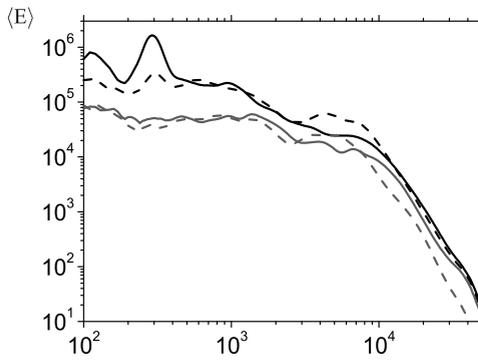


а. Первое испытание без воды

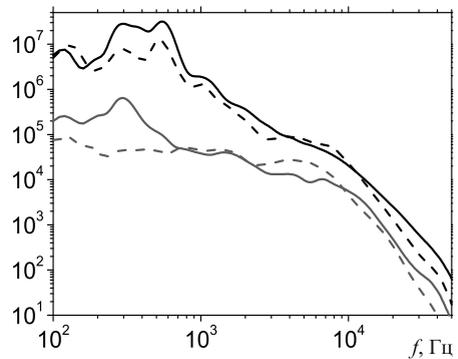


б. Второе испытание без воды

Рис. 5. Зависимость частоты дискретного тона от времени: эксперимент (отметки и сплошная линия) и математическая модель (штриховая линия).



а. Первый участок (без догорания)



б. Второй участок (с догоранием)

— Первое испытание без воды — Испытание с впрыском воды 0°
 - - Второе испытание без воды - - Испытание с впрыском воды 60°

Рис. 6. Распределение энергии по частотам.

что вода попадает глубже в струю и распространяется по большему объему струи. За счет этого увеличивается вязкость и тем самым скорость диссипации мелкомасштабных турбулентных вихрей. На втором участке главную роль в распределении энергии играет дискретный тон, вызванный догоранием топлива. Впрыск воды под углом 60° разрывает резонансную петлю автоколебаний и тем самым полностью уничтожает дискретный тон. Распределение энергий для впрыска под углом 60° на первом и втором участке полностью совпадают. Впрыск воды под углом 0° обрывает резонансную петлю не полностью и действует главным образом за счет снижения амплитуды дискретного тона. Таким образом, впрыск воды под углом 60° более эффективен.

4. Заключение. В работе представлено экспериментальное исследование акустического поля сверхзвуковой блочной струи твердотопливного двигателя и влия-

ние на это поле впрыска воды в слой смешения. Установлено, что процесс догорания топлива способен провоцировать дискретный тон большой амплитуды. Проведенный вейвлет-анализ показал зависимость частоты этого дискретного тона от давления внутри камеры сгорания, а теория Пауэлла помогла установить приближенную зависимость между этими параметрами. Установлено, что впрыск воды под углом 60° относительно оси струи полностью устраняет этот дискретный тон, обрывая резонансную петлю автоколебаний, описанную Пауэллом. Впрыск воды параллельно оси струи не способен полностью убрать дискретный тон. При впрыске воды под углом 60° снижение шума струи без догорания топлива оказалось более значительным, чем при впрыске 0° , за счет более интенсивного снижения пульсаций давления мелкомасштабных турбулентных вихрей.

Литература

1. Гольдштейн М. Е. Аэроакустика. М.: Машиностроение, 1981.
2. Антонов А. Н., Куцков В. М., Комаров В. В. Пульсации давления при струйных и отрывных течениях. М.: Машиностроение, 1990.
3. Sankaran S., Ignatius J. K., Ramkumar R., Satyanarayana T. N. V., Chakravarthy S. R., Pancharakesan N. R. Suppression of High Mach Number Rocket Jet Noise by Water Injection // Journal of Spacecraft and Rocket. Vol. 46, N 6. November-December, 2009.
4. Ignatius J. K., Sankaran S., Kumar A. R., Satyanarayana T. N. V., Chakravarthy S. R. Suppression of Jet Noise by Staged Water Injection During Launch Vehicle Lift-Off // International Journal of Aeroacoustics. Vol. 7, Nos. 3-4, 2008.
5. Zoppellari E., Juve D. Reduction of hot jet noise by water injection. AIAA-98-2204, 1998.
6. Max Kandula. Effective Jet Properties for the Estimation of turbulent mixing Noise Reduction by water injection. AIAA-2207-3645.
7. Ffowcs Williams J. E., Hawkings D. L. Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Vol. 264A, N 1151, May 1969. P. 321–342.
8. Короновский А. А., Храмов А. Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
9. Powell A. On the noise emanating from a two-dimensional jet above the critical pressure // Aeronautical Quarterly. Vol. 4. 1953. P. 103–122.
10. Adnan M. Abdel-Fattah. Discrete tone emission from high-pressure ratio supersonic jets from convergent-divergent nozzles // AIAA Journal. Vol. 26, N 3. 1988. P. 283–291.
11. Pack D. C. A Note on Prandtl Formula for the Wave Length of a Supersonic Gas Jet // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. Vol. 3. Pt. 2. 1950. P. 173–181.
12. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М.: ЭКОЛИТ, 2011.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2015 г.

Сведения об авторах

Бакулев Владимир Леонидович — аспирант, инженер; vlbakulev@gmail.com

Воробьев Алексей Минаевич — заместитель Генерального конструктора по науке, доктор технических наук, профессор, Заслуженный машиностроитель РФ, лауреат Государственной премии СССР, член-корреспондент РАН; kbsm65@mail.ru

SUPPRESSION OF SUPERSONIC BLOCK JETS NOISE BY WATER INJECTION

Vladimir L. Bakulev^{1,2}, Alexey M. Vorobyov^{1,2}

¹ St. Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7/9, St. Petersburg, 199034, Russian Federation; vlbakulev@gmail.com, kbsm65@mail.ru

² JSC «Design bureau of special mechanical engineering», Lesnoy pr., 64, St. Petersburg, 194100, Russian Federation; vlbakulev@gmail.com, kbsm65@mail.ru

The present work experimentally investigates an acoustic field of a supersonic block jet and suppression of the sound level by water injection. The jet is produced by a solid rocket motor. Water jets are injected to

the combined jet along its perimeter at an angle 0° and 60° . It is established that process of afterburning of fuel is capable to create discrete tone (screech) of the big amplitude and water injection at an angle 60° completely deletes this discrete tone. Wavelet transform showed a relation of frequency of discrete tone to pressure in a combustion chamber. It was determined that injection angle of 60° has greater effectiveness to reduce sound levels. Refs 12. Figs 6.

Keywords: supersonic jet noise, acoustic suppression, water injection, wavelet transform.

References

1. Goldstein M. E., *Aeroacoustics* (McGraw-Hill International Book Co., New York, 1976).
2. Antonov A. N., Kuptsov V. M., Komarov V. V., *Pressure pulsation in jet and separated flow* (Mashinostroyeniye, Moskow, 1990) [in Russian].
3. Sankaran S., Ignatius J. K., Ramkumar R., Satyanarayana T. N. V., Chakravarthy S. R., Panchapakesan N. R., "Suppression of High Mach Number Rocket Jet Noise by Water Injection", *Journal of Spacecraft and Rocket*, **46**(6), (November-December, 2009).
4. Ignatius J. K., Sankaran S., Kumar A. R., Satyanarayana T. N. V., Chakravarthy S. R., "Suppression of Jet Noise by Staged Water Injection During Launch Vehicle Lift-Off", *International Journal of Aeroacoustics*, **7**, (Nos. 3-4, 2008).
5. Zoppellari E., Juve D., *Reduction of hot jet noise by water injection*. AIAA-98-2204, 1998.
6. Max Kandula, *Effective Jet Properties for the Estimation of turbulent mixing Noise Reduction by water injection*. AIAA-2207-3645.
7. Ffowcs Williams J. E., Hawkings D. L., "Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **264A**(1151), (May 1969, 321-342).
8. Koronovskii A. A., Hramov E. A., *Continuous wavelet analysis and its applications* (Fizmatlit, Moscow, 2003) [in Russian].
9. Powell A., "On the noise emanating from a two-dimensional jet above the critical pressure", *Aeronautical Quarterly*, **4**, 103-122 (1953).
10. Adnan M. Abdel-Fattah, "Discrete tone emission from high-pressure ratio supersonic jets from convergent-divergent nozzles", *AIAA Journal*, **26**(3), 283-291 (1988).
11. Pack D. C., "A Note on Prandtl Formula for the Wave Length of a Supersonic Gas Jet", *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, **3**(2), 173-181 (1950).
12. Abramovich G. N., *The Theory of Turbulent Jets* (Cambridge, Mass., MIT Press, 1963).