

БАКУЛЕВ Владимир Леонидович

**СНИЖЕНИЕ ШУМА БЛОЧНОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ  
СТРУИ С ВОЗМОЖНЫМ ДОГОРАНИЕМ ТОПЛИВА ПРИ  
ПОМОЩИ ИНЖЕКЦИИ ВОДЫ**

Специальность 01.02.05 —  
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2016

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Матвеев Сергей Константинович**

Официальные оппоненты: **Садин Дмитрий Викторович**  
доктор технических наук, профессор,  
Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, профессор кафедры контроля качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники

**Чернышов Михаил Викторович**  
доктор технических наук, доцент,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, заведующий кафедрой «Экстремальные процессы в материалах и взрывобезопасность»

Ведущая организация: Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова (Санкт-Петербург)

Защита состоится 23 июня 2016 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.30 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте <https://dissler.spbu.ru/dissler/soiskatellyu-uchjonoj-stepeni/dissler/details/14/910.html>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.232.30, д.ф.-м.н., проф.

Кустова Е. В.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

Задачи по изучению космоса требуют непрерывного увеличения мощности двигательных установок ракет космического назначения (РКН), что неизбежно приводит к росту аэродинамического шума. Акустическое поле, генерируемое РКН во время старта, вызывает сильные виброакустические напряжения как на корпусе ракеты, так и на стартовых сооружениях, что может привести к их усталостному разрушению. Также серьезную опасность вызывает факт совпадения частотного спектра акустического излучения струи со спектром собственных частот агрегатов и приборов РКН, что может привести к резонансу. В настоящее время проблема снижения акустического воздействия на экипаж РКН является одной из главных проблем пилотируемых полетов.

В экспериментальном направлении за последнее время все большее значение приобретают вопросы снижения акустического излучения высокоскоростных реактивных струй с помощью инъекции воды в слой смешения. Несмотря на достаточно большую историю развития данного метода, ввиду того, что большинство исследований выполнено экспериментально на мелкомасштабных установках с использованием одиночных струй, а также из-за отсутствия расчетных моделей сложно прогнозировать его эффективность при изменении конфигурации сопел. Так, РКН тяжелого и сверхтяжелого классов имеют, как правило, блочную компоновку сопел двигательных установок первой ступени, что приводит к изменению характера генерации акустического поля по сравнению с односопловыми двигательными установками. Исследования особенностей излучения шума блочных сверхзвуковых струй крайне ограничены и имеют в основном экспериментальный характер. Так же современные реактивные двигатели преимущественно работают при коэффициенте избытка окислителя меньше единицы. В связи с тем, что в соплах происходит охлаждение продуктов горения, состав продуктов горения постепенно замораживается. Это приводит к тому, что в выхлопной струе может произойти догорание выхлопных газов из-за взаимодействия с атмосферным кислородом, что существенно изменяет газодинамические параметры в струе. Источники шума сверхзвуковых струй, вызванные физико-химическими процессами и, в частности, догоранием топлива, в настоящее время практически не изучены.

Таким образом, решение задач по снижению акустических нагрузок при старте РКН требует разработки новых технических систем для стартовых комплексов. Это делает **актуальным** исследование снижения акустического шума блочной сверхзвуковой струи с возможным догоранием топлива в направлении вверх по течению при помощи инъекции воды в слой смешения.

**Объектом** исследования является блочная сверхзвуковая струя, а **предметом** исследования — акустический шум блочной сверхзвуковой струи с воз-

можным догоранием топлива, излучающийся в направлении вверх по течению.

**Целью** исследования является снижение акустического шума блочной сверхзвуковой струи с возможным догоранием топлива, излучающегося в направлении вверх по течению, при помощи инжекции воды в слой смешения.

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Разработка методики проведения экспериментального исследования влияния инжекции воды в слой смешения блочной сверхзвуковой струи на акустический шум, излучающийся в направлении вверх по течению;
2. Разработка методики обработки результатов акустических измерений, позволяющей анализировать динамику акустического излучения в зависимости от изменения параметров струи;
3. Экспериментальное исследование влияния геометрических характеристик инжекции воды на акустическое поле блочной сверхзвуковой струи, излучающееся в направлении вверх по течению;
4. Экспериментальное определение источников шума блочных сверхзвуковых струй, связанных с догоранием топлива в слое смешения, разработка математической модели излучения и определение влияния инжекции воды на акустическое излучение этих источников.

**Научная новизна работы.** Основной научный результат диссертационной работы заключается в разработке нового научно-методического обеспечения, позволяющего снизить акустический шум блочной сверхзвуковой струи с возможным догоранием топлива, излучающийся в направлении вверх по течению, при помощи инжекции воды в слой смешения:

1. Разработана методика проведения испытаний, которая позволила определить оптимальные с точки зрения снижения шума углы инжекции воды в слой смешения сверхзвуковой блочной струи. Установлено, что инжекция воды под углом  $60^\circ$  относительно оси струи более эффективна в присопловой зоне модели РКН, тогда как в головной части наибольшее снижение интенсивности акустического излучения наблюдалось при инжекции воды параллельно оси струи;
2. Впервые детально исследовано акустическое поле блочных сверхзвуковых струй с догоранием топлива. Установлено, что догорание топлива может привести к значительному увеличению интенсивности акустического излучения за счет генерации дискретного тона;
3. Впервые разработана математическая модель генерации дискретного тона блочной сверхзвуковой струей с догоранием топлива.

**Научная и практическая значимость.** Научная значимость заключается в развитии теории акустического излучения сверхзвуковыми струями. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании систем снижения акустических нагрузок для стартовых комплексов перспективных РКН тяжелого и сверхтяжелого классов.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается корректностью поставленных экспериментов с наличием дублирующих систем измерения, корректностью применяемых методов и средств обработки результатов экспериментов, а также качественным совпадением с результатами аналогичных исследований других авторов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментального исследования снижения акустического шума блочной сверхзвуковой струи, излучающегося в направлении вверх по течению, при помощи инъекции воды в слой смешения;
2. Результаты экспериментального исследования особенностей акустического поля блочной сверхзвуковой струи с догоранием топлива;
3. Математическая модель генерации дискретного тона блочной сверхзвуковой струей с догоранием топлива.

Экспериментальные данные, используемые в работе, помимо автора получены сотрудниками АО «КБСМ» А. М. Воробьевым, А. Т. Макаевым, А. Б. Кузнецовым и сотрудниками филиала ФГУП «ЦЭНКИ» — НИИСК А. Б. Бутом, Т. О. Абдурашидовым.

**Апробация работы.** Результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: Международная конференция по механике «Шестые Поляховские чтения» (Санкт-Петербург, 2012 г.); III научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Старт в будущее» (Санкт-Петербург, 2013 г.); Научно-технический семинар по вопросам разработки и создания системы эксплуатации космодрома «Восточный» (Санкт-Петербург, 2013г.); Молодежная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике» (Звездный городок, 2013г.); X международная научно-техническая конференция «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам» (Санкт-Петербург, 2014 г.); Международная научно-практическая конференция «Безопасность космических полетов» (Санкт-Петербург, 2014 г.); Всероссийская научная конференция «Проблемы газовой и волновой динамики и ракетной техники» (Москва, 2014 г.); Международная конференция по механике «Седьмые Поляховские чтения» (Санкт-Петербург, 2015г.); X всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействие терроризму» (Санкт-Петербург, 2015 г.); Общероссийская научно-техническая конференция «Седьмые Уткинские чтения» (Санкт-Петербург, 2015 г.). Результаты также докладывались на научных

семинарах кафедры гидроаэромеханики Санкт-Петербургского государственного университета.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях [1–9], 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [1–3]. В работе [2] Воробьеву А. М. принадлежит общее руководство над экспериментальным исследованием; Макавееву А. Т. и Кузнецову А. Б. принадлежит разработка экспериментальной и двигательной установок; Абдурашидову Т. О. и Буту А. Б. принадлежит разработка системы измерения; автором разработана методика проведения испытаний, методика обработки результатов акустических измерений и анализ результатов. В работе [3] Воробьеву А. М. принадлежит общее руководство над экспериментальным исследованием; автору принадлежит разработка методики проведения спектрального анализа на основе вейвлетного преобразования, анализ результатов испытаний и разработка математической модели генерации дискретного тона. В работе [4] Воробьеву А. М. и Долбенкову В. Г. принадлежит идея исследования и постановка задачи; Макавееву А. Т. и Кузнецову А. Б. принадлежит разработка проектов систем гашения шума при старте РКН; автору принадлежит обоснование предложенных проектов. В работе [5] Воробьеву А. М. и Долбенкову В. Г. принадлежит идея исследования и постановка задачи; Макавееву А. Т. принадлежит разработка проектов экспериментального стенда; автору принадлежит анализ современного состояния проблемы и обоснование предложенных моделей. В работе [8] Кузнецову А. Б. принадлежит разработка двигательной установки и расчет внутрибаллистических характеристик в камере сгорания; автору принадлежит анализ результатов испытаний и разработка математической модели генерации дискретного тона блочной сверхзвуковой струей с догоранием топлива.

**Реализация и внедрение результатов исследования.** Основные результаты и выводы, представленные в диссертации, использованы в производственной деятельности АО «КБСМ» при проектировании наземного оборудования ракетно-космических систем.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 123 страницы с 45 рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит 113 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки РФ Ускову В. Н., который был научным руководителем в начале работы над диссертацией, и доктору физико-математических наук, профессору Матвееву С. К., с которым эта работа была продолжена. Автор благодарен коллективу расчетно-исследовательского отделения АО «КБСМ», и лично заместителю генерального конструктора по науке, доктору технических наук, профессору, заслуженному машиностроителю РФ Воробьеву А. М., за организацию экспериментальных исследований.

## Содержание работы

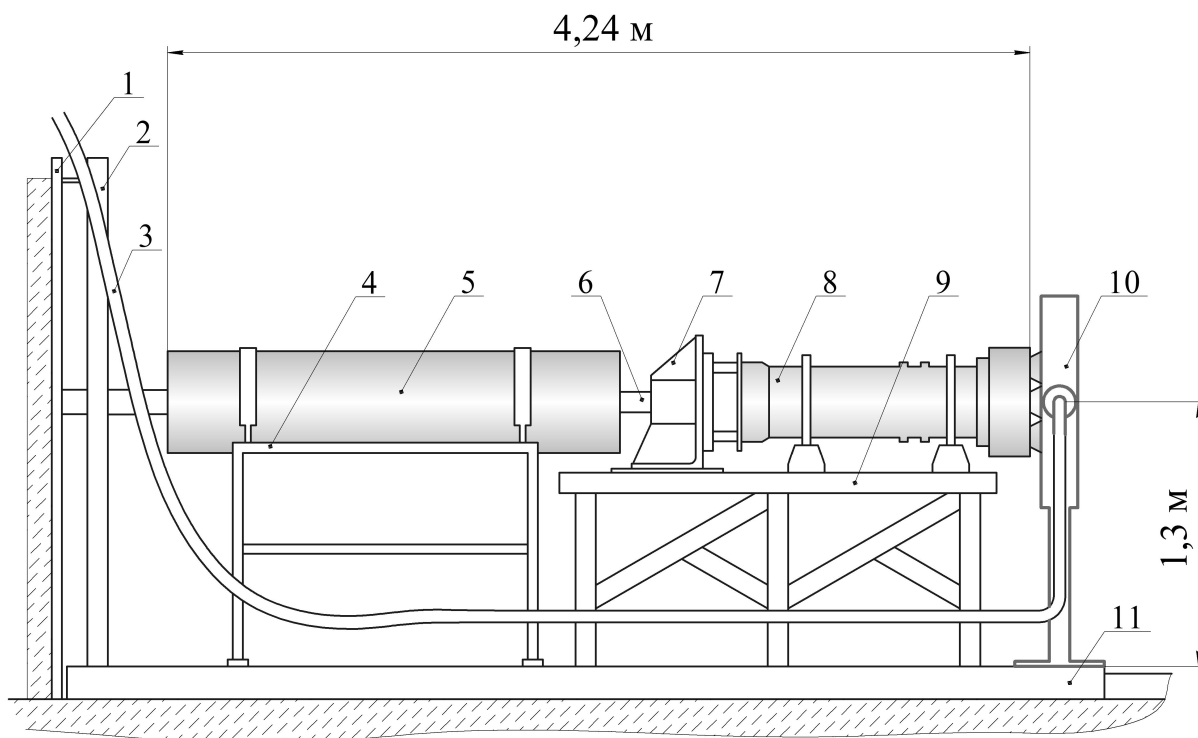
Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи, научная новизна, практическая значимость и апробация работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, изложена структура диссертации.

В **первой главе** описана структура одиночных и блочных сверхзвуковых струй на различных режимах истечения, а также основные источники акустического шума сверхзвуковых струй. Приведен обзор работ по изучению различных способов снижения интенсивности акустического излучения высокоскоростных струй. Показано, что наиболее эффективным как с технической, так и с экономической точки зрения, методом снижения шума сверхзвуковых струй для задач ракетной техники является инъекция воды в слой смешения.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментального оборудования, методик проведения испытаний, анализа акустических сигналов и численного расчета.

В п. 2.1 представлено описание экспериментального стенда 140-13Сп, разработанного АО «КБСМ» для исследования снижения акустических нагрузок на корпус РКН с помощью инъекции воды в слой смешения струи. Схема стенда изображена на рис. 1. Двигательная установка 8 вместе с имитатором корпуса РКН 5 с помощью опор 9 и 4 соответственно закреплены горизонтально на расстоянии 1.3 м от уровня бетонного основания стенда 11. Внутри имитатора расположен упор 6, который с помощью переходника 7 передает нагрузки от тяги двигателя на вертикальную стену стенда 1. Для снижения передачи вибрации от упора 6, имитатор корпуса РКН заполнен гранулами вспененного полистирола. Для уменьшения влияния отраженных акустических волн на общее акустическое поле на основании стенда 11 устанавливается звукопоглощающий экран по всей ширине и в длину на 4 м от вертикальной стены 1. На вертикальную стену 1 также устанавливается звукопоглощающий экран 2. Инъекция воды в слой смешения осуществляется с помощью кольцевого коллектора 10 через насадки-распылители, представляющие собой патрубки с форсунками. Предусмотрена возможность установки 36 насадок-распылителей. Применение насадок разного типа позволяет осуществлять инъекцию воды под углами  $0^\circ$  и  $60^\circ$  относительно оси струи двигательной установки.

В качестве модельного двигателя используется ракетный двигатель на твердом топливе СМ-А269, характеристики которого изложены в п. 2.2. Двигатель состоит из пяти конических сопел с углом полураствора  $15^\circ$  и диаметром выходного сечения  $D_a = 84.1$  мм. Число Маха в выходном сечении  $M_a = 4$ . Температура в камере сгорания  $T_0 = 2740$  К. В двигателе используется баллистическое топливо на основе нитроцеллюлозы и нитроглицерина. Продукты сгорания топлива содержат компоненты со следующими весовыми долями:  $[CO] = 0.31$ ,  $[H_2O] = 0.16$ ,  $[CO_2] = 0.38$ ,  $[N_2] = 0.14$ ,  $[H_2] = 0.01$ .



- 1 - вертикальная стена стенда; 2 - звукопоглощающий экран;  
 3 - система водоподдачи; 4 - опора имитатора РКН; 5 - имитатор РКН;  
 6 - упор; 7 - переходник; 8- двигатель СМ-А269; 9 - рама для двигателя;  
 10 - кольцевой коллектор; 11 - основание стенда.

Рис. 1: Схема экспериментального стенда

В п. 2.3 описана система измерения. На модели РКН установлено 3 пояса микрофонов: нижний — в районе днища двигательной установки, средний — на расстоянии 2.2 м от среза сопел и верхний — на расстоянии 3.3 м от среза сопел. 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 «Briel & Кjaег» (Дания). Для настройки и сквозной калибровки трактов акустических давлений использовался пистонфон 4228 фирмы «Briel & Кjaег». В п. 2.4 приведена схема видеорегистрации испытаний, которая осуществлялась двумя скоростными видеокамерами с частотой съемки 2 000 кадров в секунду.

В п. 2.5 изложена программа испытаний. Испытания без инъекции воды предназначены для определения базового значения акустического давления на корпусе РКН, его особенностей, а также определение влияния кольцевого коллектора на характеристики акустического поля струи. Цель испытаний с инъекцией воды — исследование влияния геометрических характеристик инъекции воды на акустическое поле блочной сверхзвуковой струи. В частно-



сти, с помощью инъекции под углом  $0^\circ$  определялось влияние водяных струй на шум турбулентного смешения в зоне взаимодействия струй двигательной установки между собой, а с помощью инъекции под углом  $60^\circ$  исследовалось влияние на начальный участок сверхзвуковых струй. Вода подавалась с общим расходом 30 л/с и избыточным давлением 7 атм.

В п. 2.6 представлена методика обработки результатов акустических измерений. Спектральный анализ проводился на основе вейвлетного преобразования, которое имеет свойство раскладывать сигнал одновременно по времени и по частотам. С помощью такого подхода можно определить изменение спектральных характеристик акустического сигнала с течением времени.

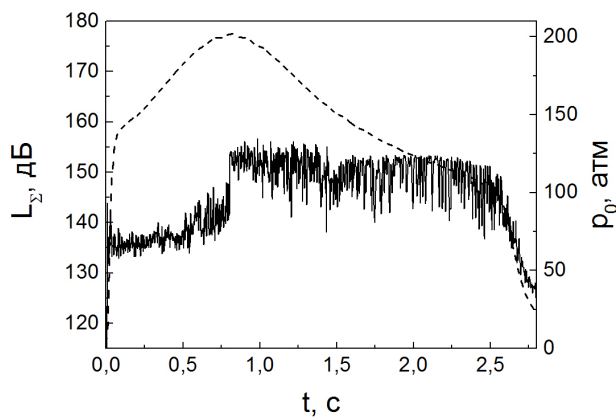
В п. 2.7 описана методика нестационарного численного расчета параметров начального участка сверхзвуковой струи с помощью уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, дополненную  $k - \omega - SST$  моделью турбулентности, с использованием коммерческого пакета ANSYS Fluent.

В **третьей главе** изложены результаты испытаний по исследованию влияния инъекции воды в слой смешения блочной сверхзвуковой струи на акустический шум, направленный вверх по течению.

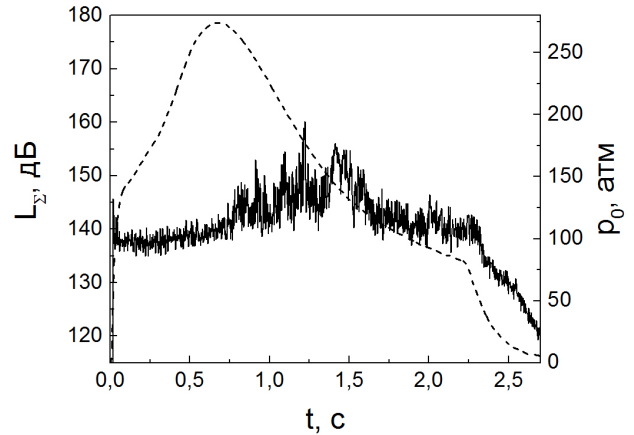
В п. 3.1 представлен анализ общего уровня звукового давления для проведенных испытаний. Установлено, что в момент достижения максимума давления в камере сгорания двигательной установки и с дальнейшим его снижением происходит догорание недоокисленных компонентов продуктов сгорания  $CO$  и  $H_2$  в атмосферном кислороде, что значительно увеличивает общий уровень звукового давления на корпусе модели РКН. Для «сухих» испытаний общий уровень звукового давления в присопловой зоне мог увеличиться на 15 дБ и достигать значения 171 дБ, а на головной части модели РКН мог увеличиться на 20 дБ и достигать значения в 159 дБ (рис. 2). В испытаниях с инъекцией воды определено, что подача воды под углом  $0^\circ$  не приводит к подавлению процесса догорания топлива, в результате чего также происходит увеличение общего уровня звукового давления после достижения максимума давления в камере сгорания двигательной установки. В свою очередь инъекция под углом  $60^\circ$  обрывает механизм догорания и, как следствие, общий уровень звукового давления на всем периоде работы двигательной установки практически не меняется.

Для дальнейшего анализа результатов акустических измерений работа двигательной установки была разделена на участок без догорания (с начала работы двигательной установки и до момента достижения максимума давления в камере сгорания) и участок с догоранием топлива (с момента максимума давления в камере сгорания до окончания работы двигательной установки).

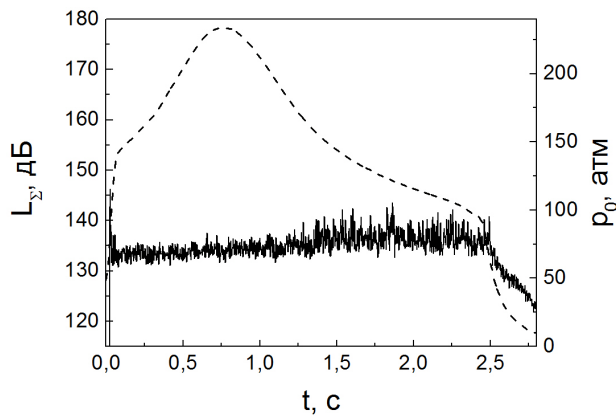
В п. 3.2 проведен спектральный анализ акустических сигналов. Локальные спектры энергии, которые характеризуют распределение акустической энергии по времени и частотам, показали, что догорание топлива провоцирует появление дискретной составляющей, частота которой монотонно увели-



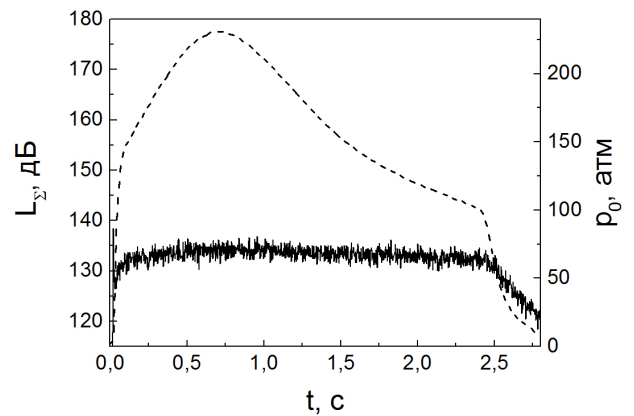
а. Без инъекции воды  
(с коллектором)



б. Без инъекции воды  
(без коллектора)



в. С инъекцией воды под углом  $0^\circ$



г. С инъекцией воды под углом  $60^\circ$

Рис. 2: Зависимость общего уровня звукового давления  $L_\Sigma$  (сплошная линия) и давления в камере сгорания  $p_0$  (штриховая линия) от времени на головной части модели РКН

чивается с уменьшением давления в камере сгорания двигательной установки (рис. 3).

На рис. 4 изображены графики глобальных спектров энергии, которые описывают интегральное распределение акустической энергии по частотам для участков с догоранием топлива и без него. Установлено, что дискретный тон, вызванный догоранием топлива, никак не влияет на распределение акустической энергии в области высоких частот, основная зона влияния — 50 — 1 000 Гц. Дискретный тон появляется и до достижения давления в камере сгорания максимального значения, но энергия этой дискретной составляющей значительно меньше. Догорание топлива не только инициирует появления дискретного тона в акустическом спектре, но и увеличивает интенсивность турбулентного перемешивания, тем самым увеличивая интенсивность шума смешения, который имеет низкочастотный характер. Также догорание топлива приводит к увеличению температуры струи и, как следствие, скорости звука в

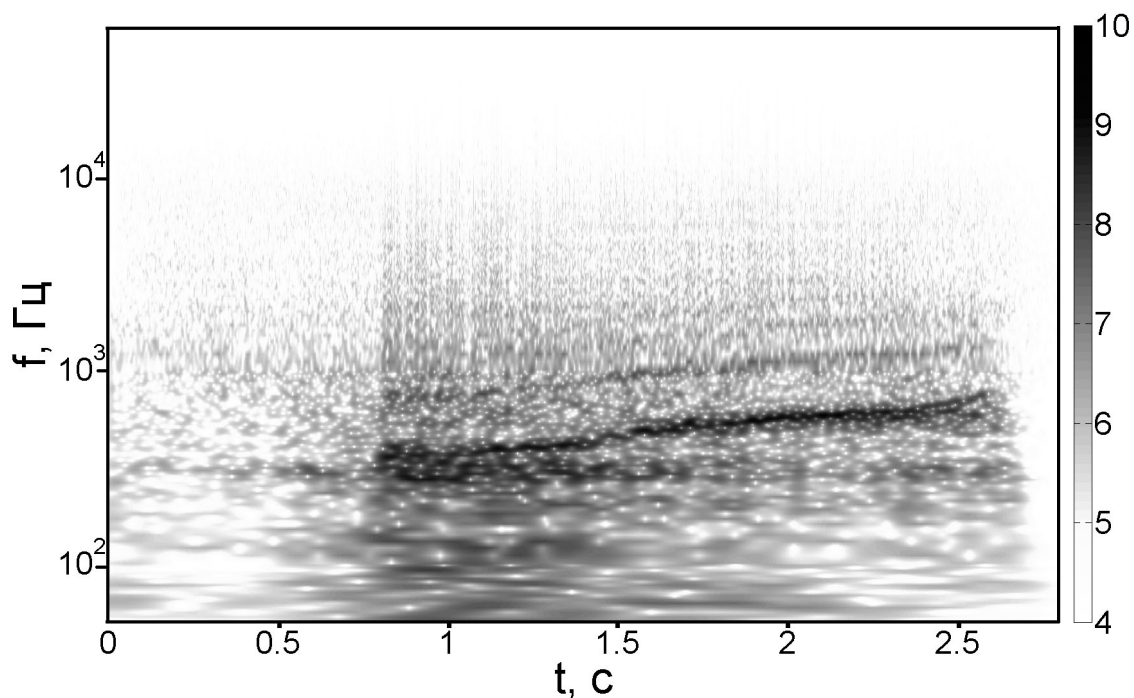


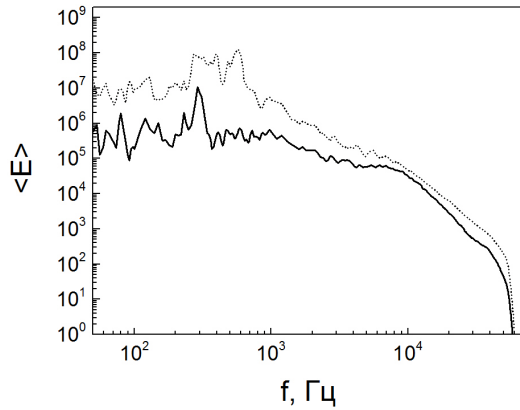
Рис. 3: Локальный спектр акустической энергии для испытания без инъекции воды на головной части модели РКН

окружающем пространстве. Это влечет за собой увеличение угла между осью струи и направлением максимума уровня звукового давления в диаграмме направленности акустического излучения, и, как следствие, увеличение уровня акустических нагрузок на корпус РКН.

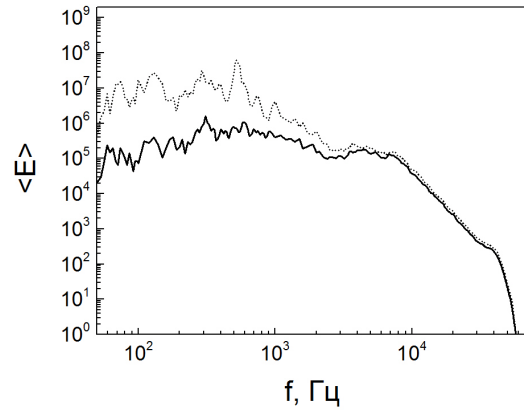
Таким образом, на режиме работы двигательной установки с догоранием топлива наиболее эффективным является инъекция воды под углом  $60^\circ$ , так как полностью ликвидирует источники шума, вызванные догоранием топлива, тогда как инъекция воды под углом  $0^\circ$  лишь снижает интенсивность этих источников.

В п. 3.3 проведено сравнение результатов экспериментов. По итогам сравнения общих уровней звукового давления на режиме работы двигательной установки без догорания топлива установлено, что наиболее эффективным в присопловой области является инъекция воды под углом  $60^\circ$ , снижая уровень шума в среднем на 4.7 дБ, тогда как подача воды под углом  $0^\circ$  практически не влияло на него. Однако в головной части модели РКН лучше оказалась подача воды под углом  $0^\circ$ , которое обеспечивало снижение уровня звукового давления в среднем на 5.5 дБ, а инъекция воды под углом  $60^\circ$  снижала в среднем на 4.2 дБ. Связано это с тем, что инъекция воды под углом  $0^\circ$  больше воздействует на мелкомасштабную турбулентность в зоне взаимодействия сверхзвуковых струй, а инъекция воды под углом  $60^\circ$  больше воздействует на ударно-волновую структуру в начальном участке струи.

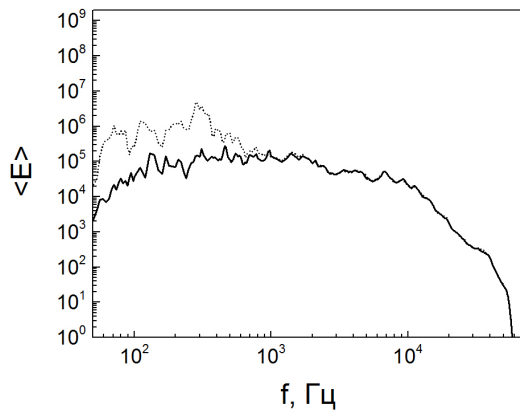
Сравнение глобальных спектров акустической энергии в присопловой области показало, что в диапазоне 50 – 3 000 Гц разница между инъекциями



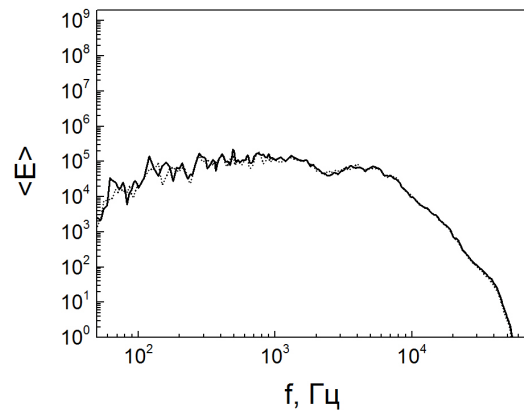
а. Без инъекции воды  
(с коллектором)



б. Без инъекции воды  
(без коллектора)



в. С инъекцией воды под углом  $0^\circ$



г. С инъекцией воды под углом  $60^\circ$

Рис. 4: Глобальный спектр акустической энергии  $\langle E \rangle$  для режима без догорания (сплошная линия) и с догоранием (пунктирная линия) топлива на головной части модели РКН

практически незаметна, тогда как в полосе частот 3 000 – 50 000 Гц инъекция под углом  $60^\circ$  является более эффективной. Вызвано это тем, что инъекция под углом  $60^\circ$ , взаимодействуя с начальным участком струи, приводит к уменьшению ударно-волнового шума, который направлен преимущественно вверх по потоку, тогда как инъекция под углом  $0^\circ$  вообще с этим участком струи не взаимодействует. Вторым фактором является экранирование кольцевым коллектором акустических волн, излучаемых дальней областью потока, в которой происходит взаимодействие струи между собой и, как следствие, генерация шума мелкомасштабной турбулентностью. Для микрофонов, расположенных на головной части модели РКН, ситуация кардинально отличается тем, что здесь уже существенный вклад вносит шум мелкомасштабной турбулентности, генерируемый в дальней области потока, тогда как ударно-волновой шум уже влияет слабо (рис. 5). Таким образом, инъекция воды под углом  $0^\circ$  вносит дополнительное снижение в полосе 2 000 – 7 000 Гц. Важно заметить, что в

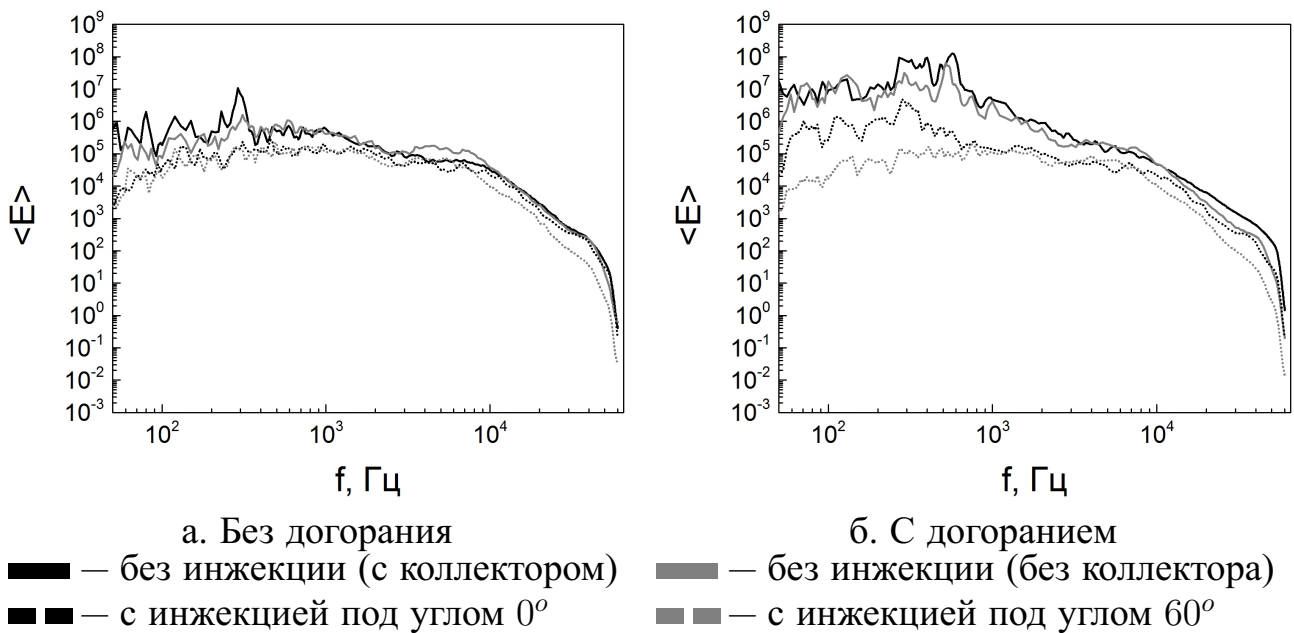


Рис. 5: Сравнение глобальных спектров акустической энергии на головной части модели РКН

полосе частот от 50 до 2 000 Гц уровни влияния инжекции воды полностью идентичны.

Сравнение глобальных спектров акустической энергии на режиме с догоранием топлива подтверждает тот факт, что главной причиной повышения общего уровня звукового давления является догорание топлива и что его устранение приводит акустический спектр к такому же виду, как и без догорания. Также стоит заметить, что влияние инжекции воды в полосе частот от 2 000 до 50 000 Гц такое же, как и при режиме без догорания топлива.

В **четвертой главе** представлена модель генерации дискретного тона, вызванного догоранием недоокисленных компонентов топлива в слое смешения блочной сверхзвуковой струи.

В п. 4.1 проведен анализ экспериментальных данных. Показано, что догорание топлива происходит вспышками, частота появления которых соответствует частоте дискретного тона в акустических сигналах. Установлено, что с уменьшением давления в камере сгорания частота появления вспышек увеличивается.

В п. 4.2 предлагается модель генерации дискретного тона. Установлена аналогия с механизмом, который описал Пауэлл в применении к излучению дискретного тона нерасчетными струями. Основное отличие заключается в следующем: во-первых, в турбулентных вихрях, образованных у кромки сопла и движущихся вниз по течению, происходит перемешивание компонентов топлива, содержащегося в выхлопных газах, и атмосферного кислорода; во-вторых, акустическая волна, обеспечивающая обратную связь, образуется в результате воспламенения топливо-воздушной смеси. Важной особенностью является дополнительное влияние излучения волн Маха соседними струями

на интенсивность перемешивания компонентов топливо-воздушной смеси в турбулентных вихрях. Такое же перемешивание происходит и по внешнему периметру струй, но намного медленней, что приводит к более позднему возгоранию, т. е. основную роль в генерации дискретного тона играет перемешивание именно в межснопой области.

На рис. 6 представлено сравнение модели генерации дискретного тона с экспериментальными данными. Параметры в начальном участке струи находились с помощью эмпирических соотношений (эмпирическая модель) и на основе численного расчета (численная модель). Несмотря на серьезные допущения, модель имеет хорошее совпадение с экспериментальными данными. Важным свойством представленной модели является ее удовлетворительное описание динамики дискретного тона.

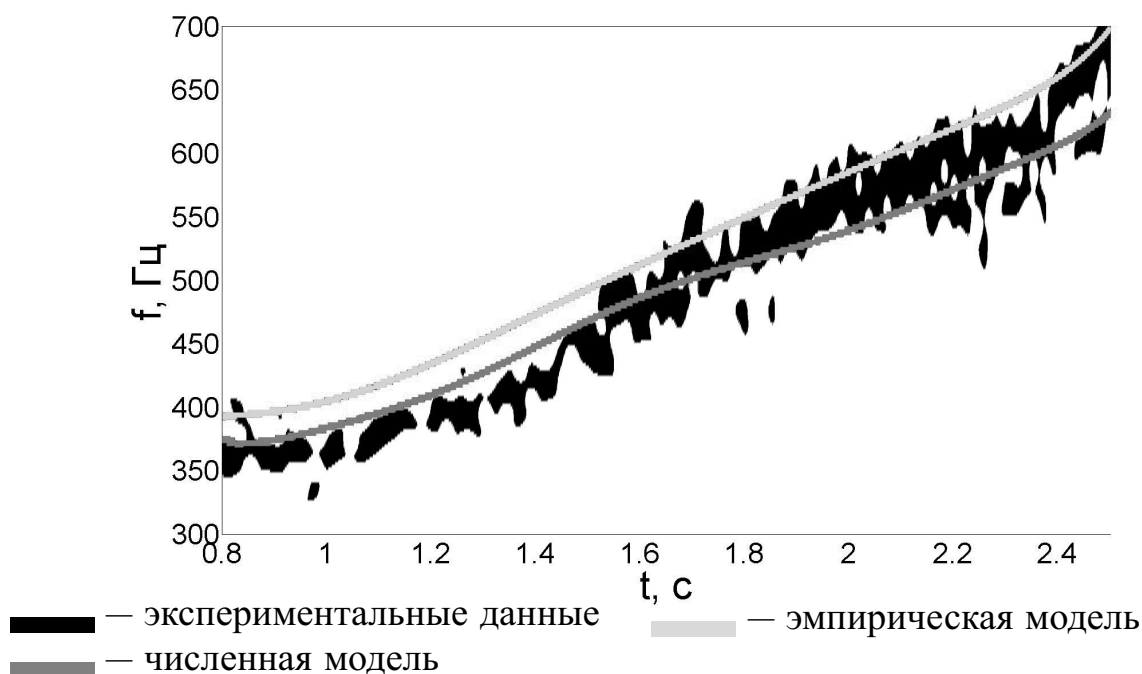


Рис. 6: Сравнение модели генерации дискретного тона с экспериментальными данными

По результатам испытаний с инъекцией воды можно сделать вывод, что подача воды параллельно оси струи не влияет на участок, в котором происходит движение топливо-воздушного вихря, и, таким образом, не влияет на зарождение колебаний огненного факела струи. В этом случае вода взаимодействует уже с пульсирующим факелом и поэтому только уменьшает его амплитуду. В свою очередь инъекция воды под углом  $60^\circ$  обрывает процесс зарождения топливо-воздушного вихря и тем самым ликвидирует процесс догорания топлива.

## Основные результаты и выводы

В работе проведено экспериментальное исследование влияния инъекции воды на акустический шум блочной сверхзвуковой струи с возможным догоранием топлива, излучающийся в направлении вверх по течению. Получены следующие результаты:

1. Догорание топлива в блочной сверхзвуковой струе приводит к значительному возрастанию общего уровня звукового давления. Связано это с тем, что догорание топлива провоцирует появление дискретной составляющей в спектре акустического шума, частота которой монотонно зависит от давления в камере сгорания двигательной установки;
2. Инжекция воды под углом  $0^\circ$  не приводит к подавлению процесса догорания топлива, а лишь снижает его интенсивность, в результате чего также происходит рост общего уровня звукового давления. Инжекция под углом  $60^\circ$  обрывает механизм горения недоокисленных компонентов топлива, что приводит к ликвидации дополнительных источников шума, вызванных догоранием;
3. При работе двигательной установки без догорания топлива наиболее эффективным в снижении акустического шума в присопловой области является инжекция воды под углом  $60^\circ$ , тогда как подача воды под углом  $0^\circ$  практически не изменяло эту величину. На головной части модели РКН лучший результат показала инжекция воды под углом  $0^\circ$ .

## Публикации автора по теме диссертации

### Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Бакулев В. Л. Применение вейвлетного анализа в исследовании особенностей акустического излучения сверхзвуковой струи // *Известия РАН*. — 2014. — № 4. — С. 41–45.
2. Problem of intensity reduction of acoustic fields generated by gas-dynamic jets of motors of the rocket-launch vehicles at launch / A. M. Vorobyov, T. O. Abdurashidov, V. L. Bakulev et al. // *Acta Astronautica*. — 2015. — Vol. 109. — Pp. 264–268.
3. Бакулев В. Л., Воробьев А. М. Снижение шума блочной сверхзвуковой струи с помощью впрыска воды // *Вестник СПбГУ. Серия 1: Математика, механика, астрономия*. — 2015. — Т. 2 (60), № 3. — С. 428–438.

### Публикации в других изданиях

4. Системы гашения акустических волн при старте тяжелых РКН / В. Л. Бакулев, А. М. Воробьев, В. Г. Долбенков и др. // *Труды молодежной конференции «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике». Звездный городок.* — 2013. — С. 101–110.
5. Методология экспериментального исследования процессов, сопровождающих возможные аварии при старте ракетно-космического носителя и других взрывоопасных изделий / А. М. Воробьев, В. Л. Бакулев, В. Г. Долбенков, А. Т. Макавеев // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму.* — 2014. — № 9-10. — С. 39–44.
6. Бакулев В. Л. Особенности экспериментального исследования снижения шума сверхзвуковой струи // *Седьмые Поляховские чтения: Тезисы докладов Международной конференции по механике. Санкт-Петербург.* — 2015. — С. 75.
7. Bakulev V. Features of experimental research of supersonic jet noise reduction // *International Conference of Mechanics - Seventh Polyakhov's Readings. Saint Petersburg, Russia.* — 2015. — Pp. 1–3.
8. Бакулев В. Л., Кузнецов А. Б. Акустическое поле блочной сверхзвуковой струи с догоранием топлива // *Сборник трудов X всероссийской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействие терроризму». Санкт-Петербург.* — 2015. — С. 15–22.
9. Бакулев В. Л. Влияние догорания топлива на акустическое излучение блочных сверхзвуковых струй // *Сборник трудов общероссийской научно-технической конференции «Седьмые Уткинские чтения». Санкт-Петербург.* — 2015. — С. 80–84.