

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.45.018.2

doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-113-123

Экспериментальные исследования демонстратора двигательной установки с центральным телом

С.Д. Ваулин, В.Л. Салич, А.В. Ерпалов, А.О. Шульц,
К.А. Хорошевский, К.И. Хажиахметов

Южно-Уральский государственный университет

Experimental study of the propulsion system demonstrator with a central body

S.D. Vaulin, V.L. Salich, A.V. Erpalov, A.O. Schulz,
K.A. Khoroshevskii, K.I. Khazhiakhmetov

South Ural State University

Приведены результаты испытаний демонстратора двигательной установки с центральным телом, состоящего из шестнадцати камер ракетных двигателей малой тяги, расположенных вокруг центрального тела. Особенность двигательной установки с центральным телом заключается в наличии свойств саморегулирования, зависящих от давления внешней среды. Выполнены исследования процессов, возникающих при работе двигательной установки при различных режимах, включавшие в себя изучение вибросостояния, измерение тяги, оценку собственных частот колебаний конструкции и анализ звукового давления.

Ключевые слова: двигательная установка, ракетный двигатель, центральное тело, экспериментальный модальный анализ, вибросостояние демонстратора, акустическое воздействие

The paper presents results of testing the propulsion system demonstrator with a central body consisting of sixteen chambers of the low-thrust rocket engines positioned around the central body. Peculiarity of a propulsion system with the central body lies in the presence of self-regulation properties depending on the external environment pressure. Processes were analyzed arising in the propulsion system operation in various modes, including vibration state, thrust control, assessment of the structure natural vibration frequencies and analysis of the sound pressure.

Keywords: propulsion system, rocket engine, central body, experimental modal analysis, demonstrator vibration state, acoustic impact

Общемировое развитие аэрокосмической отрасли требует применения уникальных подходов, позволяющих решать новые задачи, необходи-

мые для дальнейшего развития науки и техники. Одной из наиболее перспективных разработок является многоцветная одноступенчатая ракета-

носитель. Успешная реализация проекта позволит существенно снизить стоимость доставки полезного груза на орбиту, обеспечит высокую степень оперативности пусков, а также откроет новый класс уникальных задач для ракетно-космической техники [1–3].

Разработка широкодиапазонного реактивного двигателя (РД), обладающего свойством саморегулирования в зависимости от высоты полета ракеты-носителя, является необходимым условием для успешной реализации ее проекта [4].

Мировой опыт создания двигательных установок (ДУ) с центральным телом (ЦТ) достаточно широк: исследования начались в США в 60-е годы XX века и продолжаются до сих пор [5, 6]. Однако в результате обзора литературы не обнаружены примеры успешной реализации летного образца ракеты-носителя, оснащенной ДУ с ЦТ. Это в первую очередь обусловлено существенными конструкторскими и технологическими сложностями, связанными с разработкой ДУ с ЦТ. Немало сложностей вызывает и экспериментальная отработка ДУ ввиду сложности и малоизученности установки такого вида.

Решением научных и технических задач, связанных с разработкой и испытанием ДУ, Южно-Уральский государственный университет занимается совместно с АО «ГРЦ Макеева» и АО «НИИМаш» при финансовой поддержке губернатора Челябинской области и Уральского межрегионального научно-образовательного центра в рамках реализации проекта демонстратора ДУ с ЦТ.

Актуальность. Выполненные исследования позволяют существенно расширить область знаний и получить новую информацию о процессах, возникающих при работе жидкостной ракетной ДУ с ЦТ.

Состав демонстратора ДУ с ЦТ. Демонстратор ДУ с ЦТ (рис. 1) представляет собой многосопловой двигательный блок с размещенным симметрично в центре профилированным ЦТ из мелкозернистого графита. Количество РД — 16, они могут включаться как отдельно, так и совместно в любых комбинациях. Рабочий процесс в РД организован техническими решениями, успешно примененными ранее для кислородно-керосиновых РД тягой 20 Н [7–9].

В качестве компонентов топлива используются жидкий этиловый спирт (не менее 95 %

по объему в смеси с водой) и газообразный кислород. Для подачи горючего применены блок подачи горючего (бак с вытеснением сжатым азотом) и кислородная рампа с моноблоками. Максимально допустимое рабочее давление горючего на входе в РД — 2,5 МПа, окислителя — 2,5 МПа (здесь и далее указаны значения избыточного давления). Компоненты топлива поступают в магистрали и через фильтры — в топливные коллекторы демонстратора.

На каждом отдельном РД расположены электрические клапаны горючего и окислителя. Клапаны со стороны входов присоединены к коллекторам горючего и окислителя.

Для воспламенения компонентов топлива в камерах сгорания РД задействованы высоковольтные электроискровые блоки и свечи зажигания, для охлаждения ЦТ газообразным азотом — коллектор и патрубки обдува.

ДУ размещена на раме с регулируемыми опорами по схеме гексапода. По той же схеме сделан тягоизмеритель с шестью датчиками тяги, который позволяет измерять составляющие тяги и моменты по всем направлениям.

Система управления демонстратором состоит из двух основных частей:

- пульта управления с контроллером и сенсорным дисплеем;
- промежуточного шкафа с модулями ввода-вывода и блоками питания силовых элементов демонстратора и блоков подачи компонентов топлива.



Рис. 1. Внешний вид демонстратора ДУ с ЦТ

Одним из условий проведения эксперимента являлась возможность изменения расхода одного их компонентов топлива. В качестве регулятора подачи газа наддува выбран электронный регулятор давления газа, максимальный расход которого составляет $1,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с при давлении газа до 2,5 МПа, что удовлетворяет условиям испытаний.

Управление регулятором осуществляется по трехпроводной схеме с помощью подачи регулируемого напряжения на управляющий вход. Давление на выходе регулятора прямо пропорционально напряжению на входе и стабилизируется по сигналу с внутреннего датчика давления, что дает возможность легко контролировать выходное давление. Регулятор также позволяет сбрасывать излишнее давление на выходе, что обеспечивает быструю перенастройку рабочего давления наддува в баке горючего.

Для экстренного тушения воспламенения в нештатных ситуациях (таких как протечка горючего, воспламенение кабелей, перегрев элементов конструкции демонстратора) применяют систему аварийного пожаротушения. Она состоит из емкости с водой, насоса, клапана подачи воды и форсунок, расположенных на верхней части рамы демонстратора. Подача воды осуществляется по команде оператора с пульта управления.

Экспериментальные пуски ДУ с ЦТ. Измерение тяги. В процессе испытаний (рис. 2) давление на линии окислителя ступенчато увеличивалось до 2,5 МПа, на линии горючего до 1,05 МПа. Продолжительность испытаний ограничили 5...6 с, что обусловлено интенсивным нагревом ЦТ и эрозией его поверхности. При этом коэффициент избытка окислителя

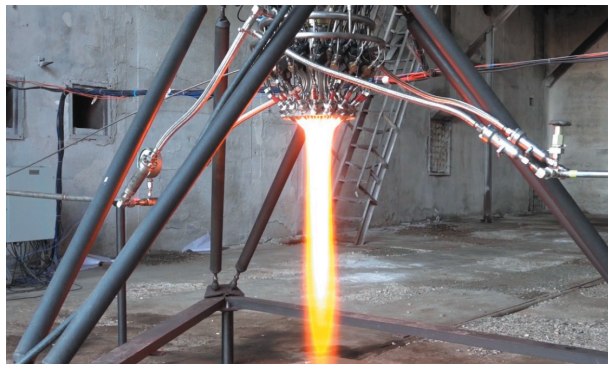


Рис. 2. Фрагмент испытаний демонстратора ДУ с ЦТ

находился в пределах 2,0...2,5, а давление в камерах сгорания — в диапазоне 0,7...0,8 МПа.

Максимальная тяга демонстратора в конце испытаний при максимальных давлениях составила около 1500 Н, тяга отдельного РД при повышенных расходах окислителя достигала 100 Н. Наблюдалось слияние дискретных струй от РД в одну струю с наличием скачков уплотнений за ЦТ.

При наблюдении за работой демонстратора на предельных режимах испытаний четко выделяются скачки уплотнения сверхзвуковых струй, которые постепенно сливаются в выраженные кольцевые скачки.

Исследование вибросостояния демонстратора ДУ с ЦТ. Оценка вибросостояния демонстратора необходима, чтобы решить следующие задачи:

- определение собственных резонансных частот конструкции ДУ в состоянии покоя;
- нахождение частотных характеристик струй продуктов сгорания и их силового воздействия на конструкцию демонстратора;
- оценка силового воздействия в процессе пуска и останова РД на конструкцию демонстратора;
- определение частотных характеристик при различных значениях расходов компонентов топлива.

Для проведения испытаний при разных режимах работы ДУ с регистрацией виброускорений выполнена подготовка объекта исследования — демонстратора — и установка однокомпонентного датчика виброускорений. Выбрана модель датчика с чувствительностью 100 мВ/г, ось которого размещена для регистрации виброускорений в вертикальном направлении. Стабильность амплитудно-частотной характеристики использованного акселерометра в частотном диапазоне 0,5...3000,0 Гц составляла ± 5 %.

В связи с тем, что рабочие процессы при функционировании ДУ являются высокочастотными, дополнительно на отдельных режимах ее работы проведена оценка акустического воздействия с помощью узконаправленного микрофона РСВ с чувствительностью 45 мВ/Па (250 Гц) в частотном диапазоне до 20 кГц. Микрофон установили на расстоянии 10 м от демонстратора.

Для регистрации сигналов использован программно-аппаратный комплекс SIEMENS,

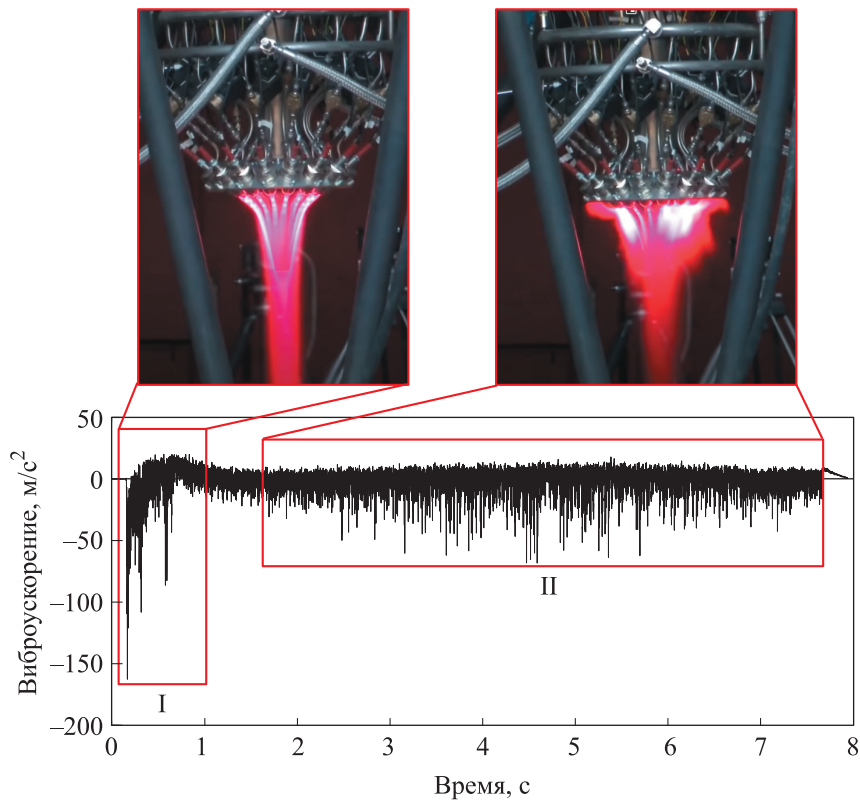


Рис. 3. Результаты исследования характера изменения виброускорения в процессе работы ДУ

включавший в себя регистрирующую аппаратуру LMS SCADAS Mobile и программный комплекс LMS Test.Xpress.

Полученные данные обработаны в программных пакетах LMS Test.Xpress и MATLAB, которые имеют широкий спектр возможностей для статистической обработки и анализа результатов испытаний.

Измерения проведены при температуре внешней среды 15...20 °С. Частота дискретизации регистрируемых значений составляла 51 200 Гц.

Ввиду стабильности амплитудно-частотной характеристики акселерометра в полосе частот до 3 кГц к сигналу с датчика виброускорений использован метод уменьшения разрядности сигналов до 3,2 кГц совместно с низкочастотным фильтром Баттервода. Частотность сигнала микрофона сохранялась исходной. В результате испытаний получены осциллограммы с датчиков виброускорений и микрофона.

Результаты исследования характера изменения виброускорения в процессе работы ДУ приведены на рис. 3, где можно выделить два

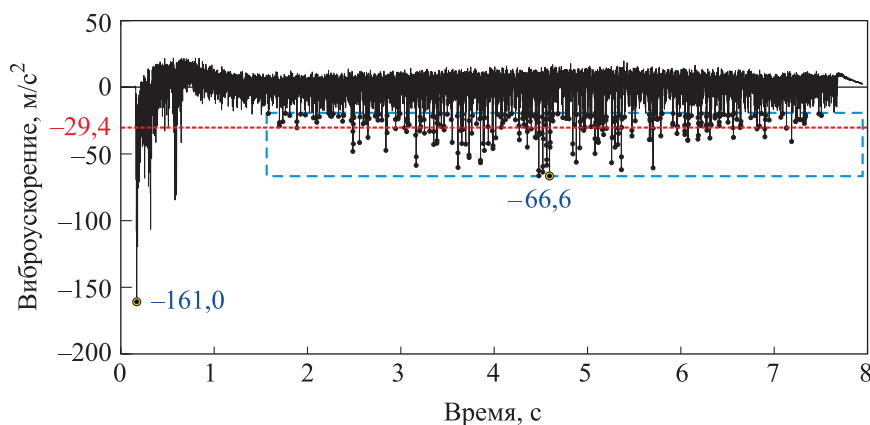


Рис. 4. Результаты первичной статистической обработки полученных данных

участка. На участке I наблюдается резкое увеличение виброускорения, на участке II — последующая стабилизация процесса. Выполненная съемка работы ДУ объясняет появление этих участков: пуск ДУ сопровождается ее нестабильной работой, которая продолжается менее одной секунды, после чего ДУ выходит на нормальный режим, когда из всех сопел наблюдается равномерное истечение газов.

Следует отметить, что пиковые значения виброускорения преимущественно отрицательные. Это объясняется возникновением пульсаций тяги в вертикальном направлении, в то время как положительная ось датчика направлена в обратную сторону по отношению к вектору тяги.

Результатом первичной статистической обработки является выделение максимумов (в целом для процесса) и минимумов (отдельно для участков I и II). Для участка II также выделен интервал (рис. 4, горизонтальные синие штриховые линии), который снизу ограничен минимальным значением виброускорения, а сверху — максимальным значением виброускорения с отрицательным знаком. На заданном интервале найдены пиковые значения виброускорения, и их среднее значение (см. рис. 4, красная линия).

Максимальные пики виброускорений достигаются при давлении наддува бака горючего 1,08 МПа. Причем уровень максимальных виброускорений составляет 57,6 м/с², а уровень отрицательных значений для участка № 1 (пуск ДУ) — 208 м/с², отрицательные значения для участка № 2 (стабильная работа ДУ) — 90 м/с².

Зависимости виброускорения от давления наддува бака горючего для режимов работы ДУ

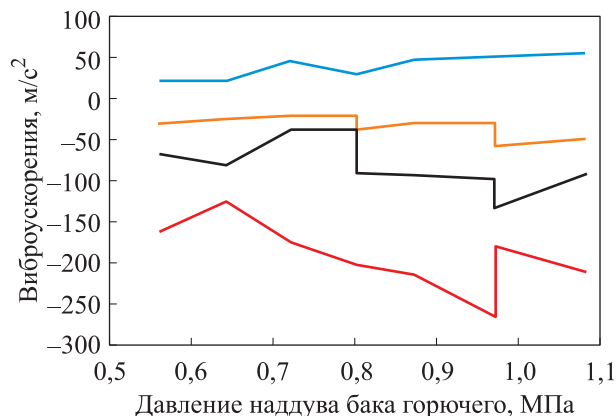


Рис. 5. Зависимости виброускорений от давления наддува бака горючего:
— максимальных; — и — минимальных на участке I и II соответственно; — среднего по пиковым значениям на участке II

с шестнадцатью РД приведены на рис. 5. Видно, что в целом с ростом давления наддува бака горючего повышается и виброускорение, причем двукратное увеличение давления приводит примерно к такому же возрастанию виброускорения.

Дальнейшая обработка сигналов виброускорений выполнена в частотной области методами спектрального анализа.

Временные реализации виброускорения для всех режимов работы ДУ разложены в ряд Фурье — получены спектральные плотности мощности (СПМ) процессов [10], которые позволяют оценить их частотность и выделить резонансные пики. Характерный вид СПМ виброускорений показан на рис. 6.

Анализ графиков СПМ показывает, что возбуждаются преимущественно одни и те же частоты, однако их уровни сильно различаются от режима к режиму.

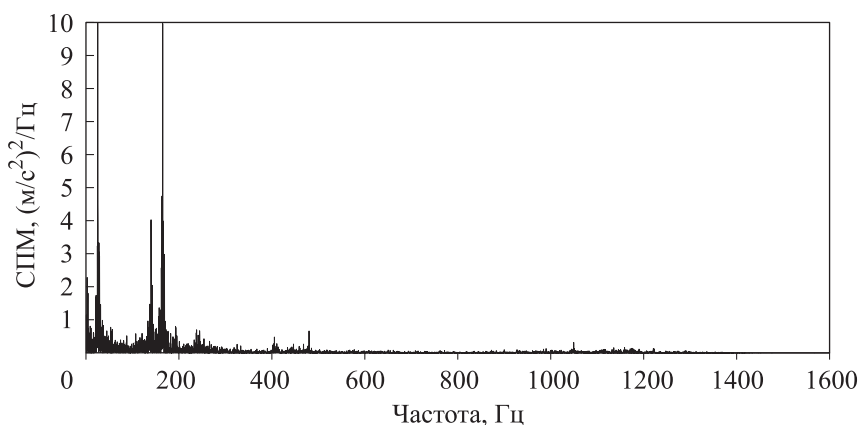


Рис. 6. Зависимость СПМ виброускорений от частоты колебаний

В связи с этим выполнено линейное осреднение СПМ для всех режимов работы ДУ. Основные возбуждающие частоты колебаний, зарегистрированные датчиком виброускорений, лежат в диапазоне частот до 500 Гц. Более широкий диапазон частот зарегистрирован узконаправленным микрофоном.

Анализ экспериментальных данных звукового давления. Звуковое давление регистрировал микрофон в виде переменного избыточного мгновенного давления в точке, расположенной на расстоянии 10 м от демонстратора. Пиковые значения звукового давления, составившие 169 Па, зарегистрированы для режима № 2.

Аналогично осциллограммам виброускорений для звукового давления можно выделить участки пуска ДУ и ее стабильной работы. Однако на сигнал также накладываются все акустические воздействия, в том числе и отраженные звуковые волны от стен помещения, где расположен демонстратор. В связи с этим трудно выделить стационарный участок процесса изменения звукового давления для его последующего разложения в частотной области.

Одним из методов обработки таких процессов и разложения их в частотной области является выполнение преобразования Фурье со скользящим окном по времени. Суть этого метода заключается в делении всей временной реализации на отдельные небольшие участки и в применении к каждому из них дискретного преобразования Фурье [11].

Уровень звукового давления определяется выражением

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

где p и p_0 — звуковое давление и его опорное (эталонное) значение, соответствующее порогу слышимости человека, $p_0 = 20$ мкПа.

Следует отметить необходимость применения взвешенной функции к получаемым спектральным характеристикам звукового воздействия, что позволяет учесть неодинаковую чувствительность органов слуха к звукам разных частот при измерении уровня шума. Использована стандартная А-взвешенная функция, которая охватывает весь диапазон человеческого слуха.

В результате разложения в ряд Фурье с применением скользящего окна и учетом А-взвешенной функции получены трехмерные графи-

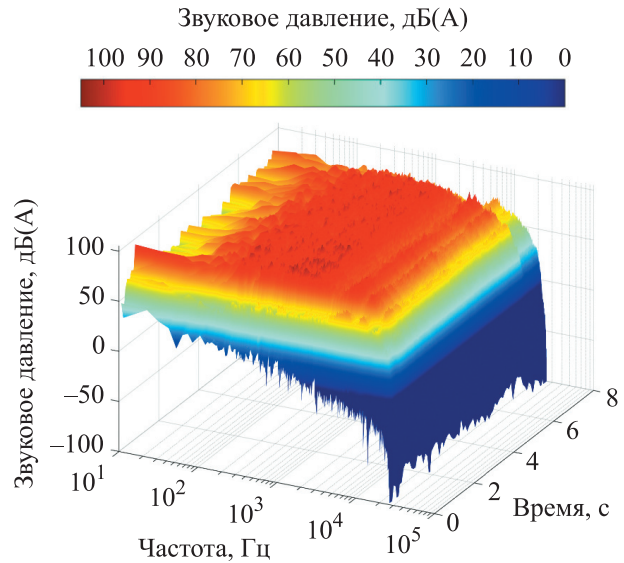


Рис. 7. Характеристики процесса в частотно-временной области

ки, отражающие характеристики процесса в частотно-временной области (рис. 7).

Максимальный уровень звукового давления составляет 103...104 дБ(А). Спектральный состав звукового давления в момент включения ДУ отличается наличием амплитудных низкочастотных составляющих. После выхода ДУ на режим в большей степени проявляются частоты в диапазоне 150...2500 Гц.

Также имеют место резонансы в области частот 6,2 и 10,2 кГц. Однако причина их возникновения неясна и требует дополнительного анализа, включающего в себя расчетный модальный анализ ДУ, оценку высокочастотных осцилляций от пульсации давления [12–14]. При частоте колебаний более 16 кГц происходит резкое падение уровня звукового давления, что обосновано формой А-взвешенной функции.

Исследование собственных частот колебаний.

Для исследования использованы описанные ранее регистрирующая аппаратура и датчик виброускорений. Частота дискретизации регистрируемого сигнала составляла 400 Гц.

Возбуждение системы ДУ — рама — основание — бетонный пол осуществлялось ударом модального молотка в вертикальном направлении по ЦТ. Направление удара обусловлено необходимостью возбудить формы колебаний системы, аналогичные возникающим при работе ДУ. Методика проведения экспериментального модального анализа подробно изложена

в работе [15]. Сила удара по показаниям регистрирующей аппаратуры составляла 136 Н, отклик системы в виде максимальных виброускорений — $81,43 \text{ м/с}^2$.

Для определения собственных частот системы выполнено дискретное преобразование Фурье сигнала затухающих колебаний виброускорений. Так как использованный при испытаниях модальный молоток позволял возбудить в исследуемой системе только низкочастотные колебания, полученный спектр ограничен частотой порядка 50 Гц. Выявлено семь пиков в низкочастотном диапазоне до 50 Гц, являющихся собственными частотами колебаний системы ДУ — рама — основание — бетонный пол.

На заключительном этапе оценки виброостояния демонстратора выполнено сопоставление возбуждающих частот колебаний при разных режимах работы ДУ с собственными частотами всей системы.

Анализ данных показал, что по меньшей мере одна собственная частота системы в диапазоне 14...15 Гц возбуждается при работе ДУ. Однако собственные частоты системы удалось получить только в низкочастотной области до 50 Гц, и нет гарантии отсутствия собственных форм колебаний системы на высоких частотах.

Для решения этой проблемы в дальнейшем предлагается провести полноценный экспериментальный модальный анализ отдельно ДУ с ЦТ без рамы, вывешенного на упругих подвесах, с возбуждением разных диапазонов частот вплоть до 1 кГц. Кроме того, планируется выполнить расчетный и экспериментальный модальный анализ отдельно ДУ, рамы и рамы с ДУ с целью идентификации динамических свойств демонстратора. Такие исследования позволят уточнить и подробно проанализировать собственные частоты и формы колебаний всей системы в широком диапазоне частот.

Еще одной проблемой сопоставления возбуждающих частот колебаний при разных режимах работы ДУ с собственными частотами колебаний всей системы был сильно зашумленный сигнал с датчиков виброускорений, особенно в низкочастотной области, что не позволило корректно выявить все возбуждающие частоты при работе ДУ. Проблему можно решить применением менее чувствительных датчиков виброускорений.

Выводы

1. Разработан и испытан демонстратор ДУ с ЦТ, состоящий из шестнадцати камер РД, расположенных вокруг графитового ЦТ. Получены значения тяги ДУ для различных режимов работы.

2. Выполнены экспериментальные исследования виброостояния демонстратора ДУ с ЦТ при разных режимах работы ДУ с варьированием давления наддува бака горючего в диапазоне 0,56...1,08 МПа. В результате исследования выявлено следующее:

- характеры вибронгруженности при запуске ДУ отличаются от таковых при последующем выходе ее на режим работы;

- пиковые значения виброускорений преимущественно отрицательные, что объясняется возникновением пульсаций тяги в вертикальном направлении и особенностями расположения оси датчика виброускорений;

- максимальные пики виброускорений достигаются при давлении наддува бака горючего 1,08 МПа и составляют $57,6 \text{ м/с}^2$ в диапазоне частот до 200 Гц; уровень отрицательных значений при пуске ДУ — 208 м/с^2 , уровень отрицательных значений после выхода ДУ на режим работы — 90 м/с^2 ; полученные значения перегрузок при работе ДУ чрезвычайно высокие для используемых в испытаниях датчиков виброускорений; с этой точки зрения целесообразнее применять датчики с более низкой чувствительностью (0,1...1,0 мВ/г); на момент проведения испытаний датчики требуемой чувствительности отсутствовали, в связи с чем во временных реализациях на отдельных режимах испытаний наблюдался выход датчиков за диапазон измерения;

- с ростом давления наддува бака горючего повышается уровень вибрации, причем двукратное увеличение давления приводит примерно к такому же возрастанию виброускорения;

- при одних и тех же значениях давления наддува бака горючего (разные режимы испытаний) уровни виброускорений заметно различаются; не для всех режимов прослеживается нарастание уровня вибрации с ростом давления наддува бака горючего; аналогичная ситуация наблюдается и для тяги ДУ, регистрируемой штатной системой; вероятно, это вызвано разными условиями работы ДУ и требует проведения повторных испытаний с целью уточнения показаний и набора статистических данных.

3. Выполнен спектральный анализ сигналов виброускорений. Из осредненной СПМ виброускорений для всех режимов работы ДУ выделены возбуждающие частоты, равные 14,2; 130,6; 158,5; 269,5 и 478 Гц.

4. Исследовано изменение звукового давления в диапазоне частот до 20 кГц на отдельных режимах работы ДУ с помощью узконаправленного микрофона, расположенного на расстоянии 10 м от демонстратора. Также на сигнал накладывались все акустические воздействия, в том числе отраженные звуковые волны от стен помещения, где располагался демонстратор ДУ с ЦТ. Пиковые значения звукового давления составили 169 Па или 104 дБ(А).

5. Установлено, что спектральный состав звукового давления в момент включения ДУ отличается наличие амплитудных низкочастотных составляющих. После выхода ДУ на режим проявляются частоты в диапазоне 150...2500 Гц. В области частот 6,2 и 10,2 кГц наблюдается наличие резонансов, однако причина их возникновения неясна и требует дополнительных исследований. При частоте колебаний более 16 кГц происходит резкое падение уровня

звукового давления, что обосновано формой А-веса функции.

6. Выполнено экспериментальное определение собственных частот колебаний системы ДУ — рама — основание — бетонный пол. Идентифицировано семь собственных частот колебаний системы в диапазоне до 50 Гц. Анализ полученных данных показал, что по меньшей мере одна собственная частота системы в диапазоне 14...15 Гц возбуждается при работе ДУ. Однако собственные частоты системы удалось получить только в низкочастотной области до 50 Гц, и нет гарантии отсутствия собственных форм колебаний системы на высоких частотах.

7. Для решения этой проблемы в дальнейшем предполагается провести полноценный экспериментальный модальный анализ как для ДУ с ЦТ без рамы, вывешенного на упругих подвесах, с возбуждением разных диапазонов частот вплоть до 1 кГц, так и для рамы без ДУ. Такие исследования позволят уточнить и подробно проанализировать собственные частоты и формы колебаний всей системы в широком диапазоне частот.

Литература

- [1] Вавилин А.В., Дегтярь В.Г., Маханьков С.А. и др. Многоцветная многоступенчатая ракета-носитель Корона как автоматическое средство выведения. *Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований*. Химки, НПО им. С.А. Лавочкина, 2017, с. 118–131.
- [2] Вавилин А.В., Дегтярь В.Г., Маханьков С.А. и др. Назначение, возможности и особенности создания многоцветной многоступенчатой ракеты-носителя «Корона». *XLI академические чтения по космонавтике*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 21.
- [3] Вавилин А.В., Дегтярь В.Г., Маханьков С.А. и др. Вопросы создания многоцветной многоступенчатой ракеты-носителя «Корона». Продолжение работ. *XIV академические чтения по космонавтике*. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, с. 46–48.
- [4] Пешков Р.А., Ваулин С.Д., Исмагилов Д.Р. и др. Концепция цифровой модели многоцветной ракеты-носителя сверхлегкого класса. *Авиация и космонавтика. Тезисы 20-й межд. конф.* Москва, Перо, 2021, с. 354–355.
- [5] Ваулин С.Д., Хажирахметов К.И. Жидкостные ракетные двигатели с центральным телом: состояние и перспективы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 10, с. 74–83, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-74-83>
- [6] Ваулин С.Д., Хажирахметов К.И. К вопросу о проектировании двигательных установок с центральным телом для космических аппаратов. *Научный поиск. Мат. тринадцатой науч. конф.* Челябинск, ЮУрГУ, 2021, с. 39–47.
- [7] Салич В.Л. Экспериментальные исследования по созданию ракетного двигателя малой тяги на топливе «газообразный кислород+керосин». *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2018, т. 17, № 4, с. 129–140, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-4-129-140>

- [8] Салич В.Л. Разработка кислородно-керосинового двигателя тягой 25Н. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, № 1, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-1-2050>
- [9] Салич В.Л., Тараторин А.В. Расчетно-теоретические исследования теплофизических процессов в камере ракетного двигателя малой тяги. *Молодёжь. Техника. Космос. Тр. Двенадцатой общерос. молодеж. науч.-тех. конф.* Т. 1. Санкт-Петербург, Военмех, 2020, с. 289–293.
- [10] Бендат Д., Пирсол А. *Прикладной анализ случайных данных*. Москва, Мир, 1989. 540 с.
- [11] Mitra Sanjit K. *Digital signal processing. A computer-based approach*. McGraw-Hill, 2001. 866 p.
- [12] Du D., He E., Huang D. et al. Intense vibration mechanism analysis and vibration control technology for the combustion chamber of a liquid rocket engine. *J. Sound Vib.*, 2018, vol. 437, pp. 53–67, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.023>
- [13] Kanda T., Mishina Y., Hayasako S. et al. Experimental study on high-frequency combustion instability of liquid-propellant rocket engines using off-design combustion model. *Acta Astronaut.*, 2023, vol. 202, pp. 595–608, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.006>
- [14] Salarvand H., Shateri A.R., Nadooshan A.A. et al. Numerical analysis of combustion chamber from vibro-acoustic coupling characteristics point of view. *J. Vib. Eng. Technol.*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00804-5>
- [15] Heylen W., Lammens S., Sas P. *Modal analysis theory and testing*. Katholieke Universiteit Leuven, 1998. 319 p.

References

- [1] Vavilin A.V., Degtyar V.G., Makhankov S.A. et al. Reusable one stage KORONA LV for automatic launching. *Aktualnye voprosy proektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamentalnykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy* [Current Issues of Automated Spacecraft Design for Fundamental and Applied Scientific Research]. Khimki, NPO im. S.A. Lavochkina Publ., 2017, pp. 118–131. (In Russ.).
- [2] Vavilin A.V., Degtyar V.G., Makhankov S.A. et al. [Purpose, possibilities and peculiarities of creation of reusable single-stage “Korona” launch vehicle]. *XLI akademicheskie chteniya po kosmonavtike* [XLI Academic Readings on Cosmonautics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017, pp. 21. (In Russ.).
- [3] Vavilin A.V., Degtyar V.G., Makhankov S.A. et al. [On the development of a reusable one-stage Korona launch vehicle. Continuation of works]. *XIV akademicheskie chteniya po kosmonavtike*. Т. 1 [XIV Academic Readings on Cosmonautics. Vol. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020, pp. 46–48. (In Russ.).
- [4] Peshkov R.A., Vaulin S.D., Ismagilov D.R. et al. [Concept of a digital model of a reusable small-lift launch vehicle]. *Tezisy 20-oy mezhd. konf.* [Abs. 23th Int. Conf.]. Moscow, Pero Publ., 2021, pp. 354–355. (In Russ.).
- [5] Vaulin S.D., Khazhiakhmetov K.I. The state-of-the-art and prospects of aerospike engines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 10, pp. 74–83, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-74-83> (in Russ.).
- [6] Vaulin S.D., Khazhiakhmetov K.I. K voprosu o proektirovanii dvigatelnykh ustanovok s tsentralnym telom dlya kosmicheskikh apparatov. *Nauchnyy poisk. Mat. trinadtsatoy nauch. konf.* [Scientific Research. Proc. 13th Sci. Conf.]. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2021, pp. 39–47. (In Russ.).
- [7] Salich V.L. Experimental research on the development of an "oxygen (gas) + kerosene" — fueled thruster. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2018, vol. 17, no. 4, pp. 129–140, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-4-129-140> (in Russ.).
- [8] Salich V.L. Development of 25N oxygen-kerosene thruster. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, no. 1, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-1-2050> (in Russ.).

- [9] Salich V.L., Taratorin A.V. [Computational and theoretical studies of thermophysical processes in the chamber of a low thrust rocket engine]. *Molodezh. Tekhnika. Kosmos. Tr. Dvenadtsatoy obshcheros. molodezh. nauch.-tekh. konf. T. 1* [Youth. Technics. Space. Proc. 12th Russ. Youth Sci.-Tech. Conf. Vol. 1]. Sankt-Petersburg, Voenmekh Publ., 2020, pp. 289–293. (In Russ.).
- [10] Bendat J.S., Piersol A.G. Random data. Analysis and measurement procedures. Wiley, 1971. 407 p. (Russ. ed.: *Prikladnoy analiz sluchaynykh dannykh*. Moscow, Mir Publ., 1989. 540 p.)
- [11] Mitra Sanjit K. *Digital signal processing. A computer-based approach*. McGraw-Hill, 2001. 866 p.
- [12] Du D., He E., Huang D. et al. Intense vibration mechanism analysis and vibration control technology for the combustion chamber of a liquid rocket engine. *J. Sound Vib.*, 2018, vol. 437, pp. 53–67, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.023>
- [13] Kanda T., Mishina Y., Hayasako S. et al. Experimental study on high-frequency combustion instability of liquid-propellant rocket engines using off-design combustion model. *Acta Astronaut.*, 2023, vol. 202, pp. 595–608, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.006>
- [14] Salarvand H., Shateri A.R., Nadooshan A.A. et al. Numerical analysis of combustion chamber from vibro-acoustic coupling characteristics point of view. *J. Vib. Eng. Technol.*, 2022, pp. 1–11, <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00804-5>
- [15] Heylen W., Lammens S., Sas P. *Modal analysis theory and testing*. Katholieke Universiteit Leuven, 1998. 319 p.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023

Информация об авторах

ВАУЛИН Сергей Дмитриевич — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии ракетных и артиллерийских наук, директор Политехнического института, проректор по научно-образовательным центрам и комплексным научно-техническим программам, заведующий кафедрой «Двигатели летательных аппаратов». Южно-Уральский государственный университет (454080, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: vaulinsd@susu.ru).

САЛИЧ Василий Леонидович — кандидат технических наук, заместитель главного конструктора. АО «Научно-исследовательский институт машиностроения» (624740, Нижняя Салда, Российская Федерация, ул. Строителей, д. 72, e-mail: salich_vas@mail.ru).

ЕРПАЛОВ Алексей Викторович — кандидат технических наук, заместитель директора, старший научный сотрудник, Центр виброиспытаний и мониторинга состояния конструкций; инженер, Управление научной и инновационной деятельности, доцент кафедры «Летательные аппараты». Южно-Уральский государственный университет (454080, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: erpalovav@susu.ru).

Information about the authors

VAULIN Sergei Dmitrievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, corresponding member of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Director of Institute of Engineering and Technology, Vice-Rector for Research and Education Centres and Complex Scientific and Engineering Programmes, Head of the Department of Aircraft Engines. South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: vaulinsd@susu.ru).

SALICH Vasyli Leonidovich — Candidate of Science (Eng.), Deputy Chief Designer of Research and Development Institute of Mechanical Engineering (624740, Nizhnyaya Salda, Russian Federation, Nizhnyaya Salda, Stroiteley St., Bldg. 72, e-mail: salich_vas@mail.ru).

ERPALOV Aleksey Viktorovich — Candidate of Science (Eng.), deputy director, senior researcher of the Center of vibration testing and monitoring of the state of structures», Engineer of Department of scientific and innovative activities, Associate Professor of Department of Aircraft. South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: erpalovav@susu.ru).

ШУЛЬЦ Алексей Оттович — младший научный сотрудник, Научно-исследовательская лаборатория проблем физико-химии и газодинамики двигательных установок многоразовых ракет-носителей. Южно-Уральский государственный университет (454080, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: shultcao@susu.ru).

ХОРОШЕВСКИЙ Кирилл Антонович — инженер, Центр виброиспытаний и мониторинга состояния конструкций, Учебная лаборатория «Аэрокосмические технологии». Южно-Уральский государственный университет (454080, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: khoroshevskiika@susu.ru).

ХАЖИАХМЕТОВ Кирилл Игоревич — заведующий научной лабораторией «Двигательные и энергетические установки летательных аппаратов», преподаватель, аспирант кафедры «Двигатели летательных аппаратов». Южно-Уральский государственный университет (454080, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: khazhiakhmetovki@susu.ru).

SHULTZ Aleksey Ottovich — Junior Researcher, Research Laboratory of Problems of Physical Chemistry and Gas Dynamics of Propulsion Systems of Reusable Launch Vehicles. South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: shultcao@susu.ru).

KHOROSHEVSKIY Kirill Antonovich — Engineer, Center of vibration testing and monitoring of the state of structures, Educational Laboratory Aerospace Technologies. South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: khoroshevskiiskii@susu.ru).

KHAZHIAKHMETOV Kirill Igorevich — Head of the scientific laboratory Propulsion and power systems of aircraft, Lecturer, Postgraduate of Department of Aircraft Engines. South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: khazhiakhmetovki@susu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ваулин С.Д., Салич В.Л., Ерпалов А.В., Шульц А.О., Хорошевский К.А., Хажиахметов К.И. Экспериментальные исследования демонстратора двигательной установки с центральным телом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 12, с. 113–123, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-113-123

Please cite this article in English as:

Vaulin S.D., Salich V.L., Erpalov A.V., Schulz A.O., Khoroshevskii K.A., Khazhiakhmetov K.I. Experimental study of the propulsion system demonstrator with a central body. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 12, pp. 113–123, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-113-123



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям
учебное пособие А.С. Завгороднего**

«Основы законодательной метрологии»

Содержит материалы лекционной части курса «Метрология и радиоизмерения», включающие основы законодательной метрологии. Пособие снабжено справочной информацией и памятками для разработчиков технической документации в части метрологического обеспечения средств радиотехнических измерений.

Для студентов, обучающихся по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>