

## Секция 3

**Основоположники аэрокосмического  
двигателестроения и проблемы теории и  
конструкций двигателей летательных  
аппаратов**

**Г.Н. ЛИСТ – ВЕТЕРАН  
РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ**

***В.Ф. Рахманин, главный специалист  
ОАО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко»,  
e-mail: [energo@online.ru](mailto:energo@online.ru)***

На первом этапе работ по созданию ЖРД в ОКБ-456 одной из наиболее ярких личностей был Г.Н. Лист. Это был интересный во всех отношениях человек, его жизненный путь, творческая работа достойны знания о нем широкой общественности.

Родился Г.Н. Лист 23.08.1901 года в семье совладельца и директора Московского машиностроительного завода. В детские годы несколько лет подряд его вывозили в Германию, Бельгию, Швейцарию, где он лечился и одновременно стажировался в иностранных языках. В зрелом возрасте говорил и читал на немецком, английском, французском и итальянском языках.

В 1918 году поступил на физмат МГУ, но был призван в армию и служил в 1919 – 1920 годах, после продолжил учебу на машиностроительном факультете МВТУ.

С 1925 года работал на автозаводе АМО – ЗИС конструктором по моторам и трансмиссиям, в 30-х годах считался крупным специалистом по зубчатым зацеплениям.

В марте 1938 года Г.Н. Лист был арестован как вредитель и 28.05.1940 г. осужден на 10 лет. Учитывая его профессиональную подготовку, отбывать наказание он направлен в ОКБ – 4-го Спецотдела НКВД на Казанском авиазаводе.

С 1942 года Г.Н. Лист был подключен к разработке ЖРД РД – 1 и под руководством В.П. Глушко разрабатывал камеру сгорания.

За достигнутые технические успехи в июле 1944 года он вместе с другими разработчиками ЖРД был освобожден из заключения и продолжил свою работу в ОКБ – РД.

С августа 1945 года до конца 1946 года Г.Н. Лист изучает немецкую ракетную технику в Германии, а после возвращения в СССР продолжает работу в ОКБ – 456, являясь ведущим разработчиком КС. По его инициативе была разработана фундаментальная конструкция паяно-сварной КС. Г.Н. Лист был техническим руководителем разработки КС всех ЖРД, созданных в ОКБ – 456 с 1948 по 1959 гг.

С 1959 по 1962 годы он был одним из руководителей работ в ОКБ–456 по созданию электрических и ионных реактивных двигателей, затем, вместе с тематикой, был переведен в специализированное ОКБ в системе АН СССР.

В середине 60-х годов Г.Н. Лист перешел в Институт технической эстетики, где работал до своей кончины на 93 году жизни.

**ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ СТЕНДОВОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ БАЗЫ ОАО  
«НПО ЭНЕРГОМАШ ИМ. АКАДЕМИКА В.П.ГЛУШКО». О НЕКОТОРЫХ  
ОСОБЕННОСТЯХ УСТРОЙСТВА УНИКАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА  
ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖРД**

*Е.И. Пахомов,*

*главный специалист, член-корреспондент РАКЦ  
ОАО «НПО Энергомаш им. академика В.П.Глушко»,  
e-mail: [energo@online.ru](mailto:energo@online.ru)*

С проблемой подавления взрывов и пожаров при аварийном исходе испытаний ЖРД в закрытых объемах бронекламер испытатели ОАО «НПО Энергомаш» столкнулись в 1974 году с начала отработки ЖРД РД-170 – невиданного по мощности двигателя на компонентах ракетного топлива «жидкий кислород + керосин». В 1964 году в КБЭМ на огневых стендах была введена в эксплуатацию уникальная система шумоглушения, светомаскировки и нейтрализации вредных выбросов выходящего из сопла ЖРД факела. Система закрытого выхлопа позволила предприятию за 10 лет с 1964 г. по 1974 г. отработать и сдать в эксплуатацию уникальные ЖРД РД-253, РД-263, РД-268 на штатных компонентах топлив «гептил + амил» и, вместе с тем, обеспечить благоприятную экологическую обстановку в жилом массиве г. Химки.

Совершенно неожиданными последствиями неизбежных аварийных исходов испытаний в начале доводки ЖРД в 1974 году стали для

испытателей взрывы и пожары в бронекерах стоек № 1 и № 2 при разрушении конструкции двигателей и проливе жидкого кислорода и керосина в объем бронекера. Об истории решения этой проблемы, ее уникальности и оригинальности рассказывает автор доклада.

Автор отдает дань уважения коллективу испытателей и проектировщиков, принявших самое активное участие в создании системы подавления взрывов и пожаров, называя фамилии наиболее отличившихся из них.

**ЖИДКОСТНЫЕ РАКЕТНЫЕ  
ДВИГАТЕЛИ РД-171М, РД-180 И РД-191:  
СОСТОЯНИЕ ПРОГРАММ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

*В.К.Чванов, первый зам. генерального директора,  
глав.конструктор,*

*Ф.Ю.Челькис, зам.начальника КБ,*

*В.С.Судаков, начальник отдела научно-технической информации  
ОАО «НПО Энергомаш имени академика В.П.Глушко»,  
e-mail: [energo@online.ru](mailto:energo@online.ru)*

Жидкостные ракетные двигатели РД-171М, РД-180 и РД-191 относятся к семейству кислородно-керосиновых ЖРД с дожиганием окислительного газа, созданному на базе ЖРД РД-170/171. ЖРД РД-170/171 были разработаны в 1976-1987 гг для РН «Энергия» и «Зенит» соответственно. Их разработка стала качественно новым шагом в создании ЖРД. Первый запуск РН «Зенит» с двигателем РД-171 был осуществлен в апреле 1985 г. В 1987г и 1988г состоялись запуски РН «Энергия» с двигателями РД-170. С 1999 г. эксплуатация двигателей РД-171 продолжается и в составе РН «Зенит 3SL» по программе «Морской старт», а в последние годы и по программе «Наземный старт».

Работы по модернизации двигателя РД-171 были продолжены в 2003-2004 гг. Сертификация двигателя РД-171М завершена в 2004 г. Серийное производство двигателя РД-171М осуществляется в НПО Энергомаш в Химках.

В 1996-1999 гг был создан двигатель РД-180 для модернизированной РН «Атлас» компании Локхид Мартин. Создание мощного двигателя первой ступени осуществлено в сжатые сроки, а отработка - на малом количестве материальной части. Сертификация двигателя для РН «Атлас 3» завершена весной 1999г, а для РН «Атлас 5» - летом 2001г. Первый запуск РН «Атлас 3» с двигателем РД-180 состоялся в мае 2000г., а РН «Атлас 5» - в августе 2002г.

Маркетингом и реализацией данного двигателя заказчику - компании ULA - занимается совместное предприятие РД АМРОСС, созданное НПО Энергомаш и Пратт-Уитни (США). В США уже поставлено свыше 40 товарных двигателей, выполнено 23 запуска РН «Атлас 3» и «Атлас 5» с двигателями РД-180 на первой ступени.

Разработка двигателя РД-191 началась в конце 1998 г. Этот двигатель предназначен для семейства отечественных РН «Ангара». Двигатель РД-191 представляет собой однокамерный ЖРД с вертикально расположенным ТНА. На начало лета 2009г изготовлено 9 доводочных и собрано 16 переборочных двигателей. Отработка РД-191 завершена в октябре 2008 года. Его характеристики полностью соответствуют требованиям технического задания. Сейчас идут завершающие доводочные испытания, а затем пройдут межведомственные испытания двигателя.

30 июля 2009 г в НИЦ РКП было успешно проведено первое огневое испытание универсального ракетного модуля УРМ-1 с ЖРД РД-191, а 1 октября – второе ОСИ. В НПО Энергомаш уже ведется изготовление двигателей для летно-конструкторских испытаний РН семейства «Ангара», которые начнутся с полета РН «Ангара 1.2» легкого класса в 2011 году, а затем полетит РН «Ангара 5» тяжелого класса.

Кратко сообщается о возможностях использования указанных двигателей в перспективных программах.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖЕСТКОЙ ПРЕГРАДОЙ**

***А.В. Воронцовский, А.Р. Полянский, К.Ю. Арефьев***

***МГТУ им Н.Э. Баумана, кафедра «Ракетные двигатели»***

В работе представлены результаты исследования по математическому моделированию упругопластических деформаций сферических частиц (ускоряемых сверхзвуковым потоком) при их взаимодействии с преградой.

В задачи моделирования входит получение распределения напряжений и температуры в частице при контакте, определение времени контакта и конечной степени деформации.

Задача рассматривается в нестационарной двумерной осесимметричной постановке с допущениями идеального упругопластического, несжимаемого материала частицы и отсутствия трения между частицей и абсолютно жесткой плоской преградой. Принято, что вектор началь-

ной скорости движения частицы перпендикулярен преграде. Математическая модель включает в себя уравнения движения, уравнения сохранения количества движения и энергии.

Задача решена численно с использованием явной конечно-разностной схемы и модифицированного лагранжева метода Уилкинса.

Начальные условия для моделирования (распределение температуры и напряжений) получены из предыдущих исследований в области движения частиц в сверхзвуковом потоке, где проводилось изучение теплообмена и расчет температурных и динамических напряжений в частице.

Проведены тестовые расчеты для частиц алюминия диаметрами 10...500 мкм в диапазоне начальных скоростей 400...800 м/с. Достигнута удовлетворительная сходимость с экспериментальными данными других авторов: отклонение расчетных и экспериментальных значений конечной степени деформации составляет 3%.

Расчеты показали, что степень деформации практически не зависит от размера частиц, а время взаимодействия – от начальной скорости. В исследованном диапазоне начальных скоростей степень деформации лежит в интервале 0,1...0,63. Зависимость времени взаимодействия от размера частиц близка к линейной. Так, для частицы диаметром 100 мкм время контакта составляет 0,35 мкс. Показано, что за время контакта отводом тепла от частицы в преграду и окружающую среду можно пренебречь. За счет перехода кинетической энергии в тепловую температура частицы может увеличиться на 20 % относительно начальной.

Данная методика может быть применена для расчета пластических деформаций частиц в технологических установках по напылению металлических покрытий на различные поверхности.

**РАСЧЕТНО – ПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМПЕТРОВ ВЫСОКОНАПОРНОГО МАЛОРАСХОДНОГО ТНА ГПВРД**

***В.Л. Семенов<sup>1</sup>, С.Ф. Максимов<sup>2</sup>, К.Ю. Арефьев<sup>2</sup>***  
***<sup>1</sup>ЦИАМ им. П.И. Баранов, <sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана***

Целью работы являлось разработка экспериментального ТНА предназначенного для оптимизационной отработки системы питания ГПВРД.

Основными особенностями системы подачи горючего разработанного ГПВРД в ЦИАМ им. П.И. Баранова является необходимость в высоком напоре (11,5 кДж/кг) при малом расходе (520 г/с). Рассматриваемые частоты вращения вала 40000 – 60000 мин<sup>-1</sup>. Увеличение частоты вращения вала ТНА приводит к существенному снижению надежности системы уплотнений и подшипниковых узлов ТНА, снижение – к увеличению габаритов. Таким образом, коэффициент быстроходности насоса ТНА ГПВРД лежит в области 25...40.

Ввиду изложенных особенностей применение традиционных для ракетно-космической технике центробежных насосов связано с низкими КПД. Согласно выполненным расчетам, КПД центробежного насоса 20 – 23% при ширине выхода из колеса менее 1 мм, что не допустимо ввиду увеличения гидравлических потерь.

Необходимость в увеличении КПД привело к разработке и экспериментальной отработке новых типов насосов. Одним из таких насосов является черпаковый насос с вращающимся корпусом.

Согласно предварительным расчетам по КПД черпакового насоса составляет 43%.

Приводом насоса является турбина, работающая на сжатом водороде. После срабатывания в турбине, согласно проекту ГПВРД, водород идет на транспирационное охлаждение кромок топливных пилонов, стабилизацию горения основного горючего и барботирование топлива. Суммарный расход водорода при этом составляет не более 12 г/с, давление за турбиной 5 бар. Для обеспечения выполнения баланса мощностей ТНА перепад давлений на турбине составляет 10, что соответствует полному давлению водорода перед турбиной 50 бар.

С целью уменьшения габаритов ТНА при сохранении оптимальных значений энергетических параметров рассмотрен вариант применения двухступенчатой турбины. Расчет турбины проводился по методике малорасходных турбин.

Рассматриваемая конструкция ТНА позволяет менять элементы конструкции для экспериментальной отработки и оптимизации параметров с целью получения рекомендаций к дальнейшей разработке летных образцов системы питания ГПВРД. В настоящий момент экспериментальный образец находится в изготовлении на производстве ЦИАМ им. П.И. Баранова.

**НЕКОТОРЫЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЖРД МНОГОРАЗОВОГО  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

**В.А. Алтунин, Ф.М. Галимов,  
Ю.Ф. Гортышов, \*В.В. Фёдоров, \*\*Л.С. Яновский**  
**(Казанский государственный технический университет**  
**им. А.Н. Туполева,**  
**\*НПО «Энергомаш» им. ак. В.П. Глушко,**  
**\*\*ЦИАМ им. П.И. Баранова)**  
*altspacevi@yahoo.com*

Фундаментальные экспериментальные исследования жидкого углеводородного горючего (УВГ) и охладителя (УВО) маки РГ-1 с применением оптической установки Теплера при критических и сверхкритических параметрах по давлению и температуре в условиях естественной и вынужденной конвекции показали, что в топливо – охлаждающих каналах рубашки охлаждения ЖРД происходят аномальные процессы: термоакустические автоколебания (ТААК) давления, процесс осадкообразования.

Установлено, что: а). ТААК давления увеличивают коэффициент теплоотдачи к УВГ (УВО) на 40%, циклично удаляют твёрдые углеродистые осадки, образуют локальные чередующиеся зоны перегревов с дальнейшим прогаром, пожаром и взрывом; б). процесс осадкообразования происходит уже через 3-5 минут после запуска ЖРД, образовавшийся слой твёрдого осадка несанкционированно, неожиданно и быстро увеличивает температуру топливо – подающих каналов греющей стенки рубашки охлаждения на 200<sup>0</sup>С и более с дальнейшим возможным прогаром, пожаром и взрывом. Эти негативные процессы ещё больше будут опаснее при создании и эксплуатации ЖРД многоразового использования (ЖРДМИ), т.к. дополнительно возникнут проблемы с захолаживанием топливных каналов, фильтров и форсунок (по вине ТААК давления), с частичным и полным закоксовыванием форсунок, с частичной и полной потерей тяги, с возможным образованием течи, с пожаром и взрывом, что, в свою очередь, приведёт к дополнительным включениям ЖРДМИ и расходу ресурса и УВГ (УВО), к невыполнению и срыву различных плановых и экстренных задач по маневрированию и т.д. Показаны новые запатентованные схемы ЖРДМИ со средствами комплексной борьбы с аномальными негативными процессами, новая методика увеличения ресурса и надёжности ЖРДМИ.

**КРИТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ  
СВЕРХЗВУКОВОГО ГАЗО–ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА  
С КОНИЧЕСКОЙ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ**

*Т. Д. Сафаргалиев, В.Г. Цегельский  
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)*

Эжекторы применяются во многих отраслях промышленности: нефтехимической нефтеперерабатывающей, нефтегазодобывающей, пищевой, в космической и глубоководной технике, тепловой и атомной энергетике и др. Способность создания вакуума газо-газовым эжектором широко используется в промышленном производстве, и при проведении экспериментальных исследований.

Известно, что наиболее выгодным режимом работы сверхзвукового газо-газового эжектора является критический режим. На этом режиме возмущения на выходе из эжектора не передаются на вход, то есть в камере смешения эжектора реализуется сверхзвуковое течение смеси газа. Таким образом, повышение давления на выходе из эжектора, при критическом режиме его работы, не будет влиять на давление эжектируемого (пассивного) газа на входе в эжектор. При значительном повышении давления на выходе из аппарата происходит срыв критического режима, и давление пассивного газа на входе в эжектор начинает повышаться и зависеть от противодействия на выходе из него.

В настоящее время, сверхзвуковые газо-газовые эжекторы с цилиндрической камерой смешения получили большую проработку и для них создана надежная методика расчета. Экспериментально и теоретически доказано, что газо-газовые эжекторы с конической камерой смешения обладают большей эффективностью по сравнению с эжекторами с цилиндрической камерой смешения (до 35%). Но до настоящего времени эжекторы с конической камерой смешения не были достаточно полно исследованы.

На стенде кафедры Э1 МГТУ им. Н. Э. Баумана были проведены испытания на ряде эжекторов с коническими камерами смешения различной геометрии.

Было установлено, что для эжектора с конической камерой смешения характерно наличие двух критических режимов, в отличие от эжектора с цилиндрической камерой смешения. Эти режимы отличаются создаваемым давлением пассивного газа на входе в аппарат, при прочих равных условиях. Причем один из критических режимов работы более эффективен и создает большее разряжение пассивного газа на входе в эжектор. Наличие двух критических режимов объясняется раз-



личными картинами течения в конической камере смешения. При этом, можно провести аналогию между критическими режимами работы сверхзвукового газо-газового эжектора с конической камерой смешения и работой сверхзвукового диффузора внутреннего сжатия. Критическим режимам работы эжектора можно сопоставить два режима работы сверхзвукового диффузора: режим запуска и рабочий режим.

При проведении испытаний эжекторов с коническими камерами смешения было установлено, что для выхода на более выгодный критический режим, необходимо создать на момент запуска аппарата как можно меньшее противодавление на выходе из него. Заметим, что для вывода сверхзвукового диффузора на рабочий режим используется похожий способ (увеличивается разница давлений на выходе и на входе в диффузор). А так же, выяснено, что подача в эжектор сначала активного газа, а потом пассивного, так же способствует выходу его на более эффективный критический режим.

В заключение отметим, что для более полного описания картины течения в конической камере смешения эжектора необходимо проведение экспериментов не только с замером статического давления газа на стенке по длине камеры смешения, но и с замером полного и статического давления в различных поперечных сечениях камеры смешения (для изучения структуры потока).

#### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ЖРД**

***Д.А. Ягодников, А.Н. Бобров, О.А. Юранев  
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)***

Одно из направлений создания современных энергетических установок (ЭУ) связано с разработкой бесконтактных и высокоэффективных средств диагностики, например, основанных на регистрации электрофизических характеристик рабочего процесса. В данной работе создана методика определения электрофизических характеристик рабочего процесса модельного газогенератора, рабочим телом которого являются продукты сгорания этилового спирта и газообразного кислорода. Конструкция газогенератора позволяет исследовать влияние конденсированной фазы на электрофизические характеристики потока, что имитирует попадание в ЖРД частиц примеси из топливных баков или частиц к-фазы, образующейся вследствие разгара элементов конструкции двигателя. Для этого перед входом в сужающуюся часть сопла в камеру

сгорания вводятся частицы порошкообразного материала на основе медного или хромоникелевого сплава.

Для регистрации электрофизических характеристик продуктов сгорания используются датчики электрического (ЭП) и магнитного полей (МП), которые позволяют в процессе эксперимента регистрировать переменные составляющие магнитного и электрического полей в частотных диапазонах 10 Гц – 10000 Гц. Получаемая в процессе огневого пуска информация регистрируется и обрабатывается с помощью мобильного цифрового регистратора-анализатора динамических процессов MIC-300M, который позволяет проводить:

- измерение и обработку параметров динамических процессов с максимальной частотой опроса 216 кГц по 16 независимым каналам;
- регистрацию, отображение, воспроизведение, передачу по локальной сети измерительной информации;
- экспресс-анализ в темпе эксперимента (спектр, 1/3 октавный спектр, АЧХ, тренд и т.д.).

Вторичная обработка (послеэкспериментальный анализ) полученной в процессе огневых испытаний информации выполнялся с помощью пакета обработки сигналов WinПОС, предназначенного для обработки измерительной информации с помощью стандартных математических и статистических методов, графического представления данных, преобразования файлов в необходимый стандарт и документирования.

Проведен спектральный анализ сигналов датчиков ЭП и МП с использованием алгоритма обработки «Амплитудный автоспектр» для наиболее характерных периодов ОСИ: до пуска (регистрация шума); в процессе работы системы воспламенения; работа ЖРД на режиме без ввода в КС частиц к-фазы и работа ЖРД на режиме с вводом в КС частиц к-фазы.

На графиках амплитудных спектров выявляются ряд пиков, соответствующих периодическим компонентам переменных ЭП и МП. В частности установлен максимум частоты шума в районе 210,9 Гц. При работе ЖРД на установившемся режиме зарегистрирован локальный максимум в районе 91330 Гц

Исследованы электрофизические характеристики двухфазного потока при радиальном вводе частиц порошка хромо-никелевого сплава в закритическую часть сопла. Зарегистрировано изменение графиков амплитудных спектров по каналам датчиков ЭП и МП.

В заключение работы сформулированы основные практические рекомендации по использованию электрофизических методов контроля

и диагностики ЖРД и выбору входных параметров для систем диагностики рабочего процесса и аварийной защиты ЖРД.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ по проекту № 08-08-00624.

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ  
МЕТОДА СВЧ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ТРТ**

***А.В. Сухов, Б.П. Лавров, А.В. Сергеев,***

***И.В. Гавриленко, В.В. Козичев***

***(МГТУ им. Н. Э. Баумана)***

При разработке новых ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) актуальной задачей является создание комплексов для исследования и диагностики процесса горения твердых ракетных топлив (ТРТ), особенно если это связано с исследованием и диагностикой неустойчивости горения на переходных режимах работы. Скорость горения является одной из основных характеристик внутренней баллистики и во многом определяет параметры РДТТ в целом. Из всего разнообразия методов исследования процессов горения ТРТ наиболее перспективными являются микроволновые [1] ввиду высокой разрешающей геометрической и временной способности и потенциально высокой точности.

Однако наряду с достоинствами данный метод имеет ряд недостатков. Одним из основных недостатков в настоящее время является не достаточно высокая точность метода измерения.

В литературе представлен анализ влияния на точность измерения процессов, сопровождающих горение ТРТ, и работы огневой части установки [2].

Основной вклад в погрешность измерения вносит рассогласование измерительного тракта [3]. Поэтому один из путей повышения точности измерения заключается в использовании метода виртуального согласования, позволяющего оценить и скомпенсировать влияние рассогласования на результаты измерения.

Кроме того, во время эксперимента на точность влияет отражение СВЧ сигнала от конструктивных элементов используемого воспламенителя. Если применяется воспламенение накаливаемой проволокой или воспламенителем с разрушаемым корпусом [4] то в процессе измерения фрагменты воспламенительного устройства могут совершать колебательные движения, крупные частицы К-фазы и оторвавшиеся куски

бронирования движутся в высокотемпературной зоне измерительного тракта, что так же вносит помехи в результаты измерения.

В процессе сгорания топлива выделяемая К-фаза и остатки бронирования увеличивают критический диаметр волновода, и СВЧ-волна проникает за фронт раздела фаз "ТРТ – продукты сгорания", что приводит к интерференции отражений от фронта горения и фрагментов бронирования, и снижает точность измерения.

Так же может вносить погрешность в результаты измерения непостоянство частоты генератора.

В работе рассмотрены и количественно оценены основные причины возникновения погрешностей при измерении скорости горения СВЧ методом и приведены рекомендации по их уменьшению.

#### Литература

1. Лавров Б. П., Шарай Ю. М., Сергеев А. В. Применение метода измерения S-параметров для исследования процесса горения твердых ракетных топлив // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12, №3. – С. 46–51
2. Зарко В.Е., Вдовин Д.В., Перов В.В. Методические проблемы измерения скорости горения твердых топлив с использованием СВЧ-излучения // Физика горения и взрыва. – 2000. №1. – С.68-78.
3. Лавров Б. П., Шарай Ю. М., Сергеев А. В., Гавриленко И.В. Определение скорости горения твердого топлива с применением измерителя полных сопротивлений СВЧ-диапазона // Вестник Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана. – 2009, – №1 – С. 28–35
4. Strand L. D., McNamara R. P. Feasibility demonstration of a variable frequency driver regression rate measurement // AIAA Paper. – 1976. – V. 76. – P. 1–9.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ В УСЛОВИЯХ СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

*А.В. Сухов, Б.П. Лавров, А.В. Сергеев,  
И.В. Гавриленко, В.В. Козичев  
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)*

В настоящее время получают все большее распространение импульсные ракетные двигательные установки (РДУ). Особенностью этих РДУ является малое время работы, а так же давление, достигающее 80-

150 МПа (800-1500 атм.), что обеспечивает значительное увеличение импульсно-тяговых характеристик ДУ [1].

В то же время, надежные данные о характере изменения параметров внутренней баллистики, в особенности основного параметра – скорости горения ТРТ, в этом диапазоне давлений представлена крайне скудно [2], что связано в первую очередь со сложностью проведения исследований на этих режимах. Таким образом, исследование процесса горения ТРТ при высоких давлениях является актуальной задачей.

По предварительным данным, скорость горения в указанном диапазоне давления может достигать 1 м/с и более. При этом время полного сгорания образцов ( $d=16\text{мм}$ ,  $l=150\text{мм}$ ) составляет  $\sim 0,15\text{с}$ , что, в свою очередь, определяет требуемую временную разрешающую способность метода измерения порядка  $10^{-4}$  с.

Из всех известных методов измерений данным требованиям в наибольшей степени отвечает СВЧ-метод измерения скорости горения.

На базе этого метода разработан экспериментальный стенд для исследования параметров горения ТРТ. Стенд состоит из огневой части с замкнутой камерой сгорания, при горении в которой образца твердого топлива развивается необходимое давление, измерительной части с СВЧ-системой измерения скорости горения и систем обеспечения.

В работе представлены полученные данные, позволяющие определить основные характеристики работы ЭУ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ведущей научной школы России, проект № НШ – 3215.2008.08.

#### Литература

1. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем // - М.: Наука, 1968. – 255с.
2. Глазкова А.П. Катализ горения взрывчатых веществ // - М.: Наука, 1976. – 263с.
3. Лавров Б.П., Шарай Ю.М., Сергеев А.В. Применение метода измерения S-параметров для исследования процесса горения твердых ракетных топлив // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12, №3. – С. 46-51.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ РАКЕТНОГО  
ДВИГАТЕЛЯ НА ГИДРОРЕАГИРУЮЩЕМ ТОПЛИВЕ С ПОМОЩЬЮ  
ПАКЕТОВ ANSYS CFX И FLOWVISION**

***Д.А. Ягодников, Ю.В. Антонов  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)***

В настоящее время во всех ведущих организациях, занимающихся разработкой и проектированием как жидкостных, так и твердотопливных ракетных двигателей уделяется повышенное внимание численному исследованию рабочих процессов, протекающих в объеме камеры сгорания (КС) двигателя. Такой подход является вполне оправданным, так как позволяет значительно сократить объем огневых стендовых испытаний и подойти к процессу проектирования проточной части камеры двигателя с теоретически более обоснованной позиции, с учётом особенностей рабочего процесса, протекающего в её объеме.

При этом в процессе численного моделирования, наряду с программами собственной разработки, всё более часто прибегают к использованию прикладных пакетов зарубежных и отечественных разработчиков программного обеспечения, таких как Ansys Workbench, Solid Works, FlowVision и др. Как следствие, встаёт вопрос о достоверности результатов, получаемых с помощью сторонних программ, так как, подробные методики и способы реализации определённых алгоритмов являются коммерческой тайной конкретной фирмы. Одним из способов решения указанной проблемы, является расчёт уже отработанных камер двигателей, по которым собран достаточный объем экспериментальных данных.

В данной работе рассматривается моделирование рабочих процессов в объеме КС ракетных двигателей с помощью пакетов Ansys CFX и FlowVision.

Сравнение результатов расчёта ряда геометрий КС ракетных двигателей малой тяги (РДМТ), полученных с помощью программы собственной разработки, с результатами расчёта пакетов Ansys CFX и FlowVision показало их удовлетворительную сходимость по скорости и температуре. Кроме того, на основании проведённых предварительных исследований можно сделать вывод о перспективности использования указанных пакетов применительно к новым, но не достаточно полно изученным процессам, таким как горение энергетических конденсиро-

---

ванных систем на основе порошкообразных металлических горючих при взаимодействии с различными окислителями.

Один из принципиальных результатов, которые получены на стадии предварительного исследования физики рабочих процессов, протекающих в экспериментальной КС двигателя, предназначенной для исследования процессов горения перспективных топлив, это наличие масштабного вихря на входе в сужающуюся часть второй зоны КС. Следует отметить, что интенсивность вихря значительно изменялась с вариацией режимных параметров двигателя. Присутствие указанной циркуляционной зоны подтвердилось в процессе расчёта по обеим рассматриваемым программам и требует дальнейшего изучения и подтверждения.

Работа выполнена при поддержке гранта «Ведущие научные школы России», проект НШ – 3215.2008.8.

---