

ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК. 621.45.018.2 УДК. 621.454.2 © А.Г. ВОРОБЬЕВ, И.Н. БОРОВИК, А.Н. ХОХЛОВ,
М.М. ЛИЗУНЕВИЧ, С.А. СОКОЛ, Н.К. ГУРКИН, И.С. КАЗЕННОВ , 2009

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОГНЕВОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ МАЛЫХ ТЯГ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА

ВОРОБЬЕВ Алексей Геннадиевич – Московский авиационный институт (государственный технический университет), старший преподаватель
e-mail: formula1_av@mail.ru

Alexey G. VOROBIEV – Moscow Aviation Institute (State Technical University), senior lecturer
e-mail: formula1_av@mail.ru

БОРОВИК Игорь Николаевич – Московский авиационный институт (государственный технический университет), старший преподаватель
e-mail: borra2000@mail.ru

Igor N. BOROVIK – Moscow Aviation Institute (State Technical University), senior lecturer
e-mail: borra2000@mail.ru

ХОХЛОВ Алексей Николаевич – Московский авиационный институт (государственный технический университет), студент
e-mail: kozlov202@mai.ru

Alexey N. HOHLOV – Moscow Aviation Institute (State Technical University), student
e-mail:kozlov202@mai.ru

ЛИЗУНЕВИЧ Михаил Михайлович – Московский авиационный институт (государственный технический университет), студент
e-mail: kozlov202@mai.ru

Michael M. LIZUNEVICH – Moscow Aviation Institute (State Technical University), student
e-mail: kozlov202@mai.ru

СОКОЛ Степан Андреевич – Московский авиационный институт (государственный технический университет), студент
e-mail: kozlov202@mai.ru

Stepan A. SOKOL – Moscow Aviation Institute (State Technical University), student
e-mail: kozlov202@mai.ru

ГУРКИН Никита Константинович – Московский авиационный институт (государственный технический университет), студент
e-mail: kozlov202@mai.ru

Nikita K. GURKIN – Moscow Aviation Institute (State Technical University), student
e-mail: kozlov202@mai.ru

КАЗЕННОВ Иван Сергеевич – Московский авиационный институт (государственный технический университет), студент
e-mail: heavigot@mail.ru

Ivan S. KAZENNOV – Moscow Aviation Institute (State Technical University), student
e-mail: heavigot@mail.ru

Статья посвящена модернизации испытательного огневого стенда кафедры "Ракетные двигатели" Московского авиационного института для исследования рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях малых тяг на экологически чистых компонентах топлива.

The technical paper about modernization of "Rocket Engine" department fire stand for investigation of working process of liquid rocket engine of small thrust on ecology clean propellant.

Ключевые слова: ЖРД малых тяг, испытания ЖРД, огневой стенд.

Key words: LRE of small thrust, test of LRE, fire stand.

Краткая история испытательного стенда

Испытательный стенд на кафедре «Ракетные двигатели» МАИ был разработан и создан в 60-х годах прошлого века. Назначение стенда – научно-исследовательские работы.

Первые компоненты, на которых он работал, были газообразный кислород и керосин. В данный момент на территории Москвы испытание на токсичных компонентах запрещено. Кислород и керосин являются экологически чистыми, в их продуктах сгорания нет токсичных веществ. В 70-х годах исследовался рабочий процесс двигателей при добавлении в горючее высокодисперсного алюминия.

К середине 80-х годов из-за прекращения финансирования стенд практически прекратил свою работу, и до конца 80-х годов испытывались только системы зажигания двигателей. С 90-х годов стенд фактически не функционировал.

Описание стенда

В конце 90-х годов на кафедре «Ракетные двигатели» было разработано несколько типов ЖРД МТ, работающих как на токсичных, так и на экологически чистых компонентах ракетного топлива (КРТ), такие, как ДМТ МАИ-202, работающий на керосине и кислороде (г), тяга 200Н, ДМТ МАИ-200-1П, 200-7П, работающий на ВПВ (высококонцентрированная перекись водорода, 98%) и керосине, ДМТ МАИ-200, работающий на АТ+НДМГ (АТ+ММГ). Из-за отсутствия работоспособного стенда, испытания не могли проводиться на кафедре. Для экспериментов использовалась испытательная база ФКП «НИЦ РКП» (до 2008 НИИХИММАШ, г. Пересвет). Привлечение сторонней организации делало даже небольшие эксперименты дорогостоящими и неоперативными. Помимо этого, к работе не могли привлекаться студенты, отсутствовала связь с учебным процессом на факультете.

В конце 2008 года по инициативе МАИ совместно с ФКП «НИЦ РКП» начались работы по модернизации испытательного стенда. Было со-

ставлено техническое задание на модернизацию стенда:

- разработка ПГС стенда на четыре автономные магистрали подачи экологически чистых компонентов:

- окислители:
высококонцентрированная перекись водорода (ВПВ, 96%), с расходом до 170 г/с, кислород (газообразный), с расходом до 4 г/с;

- горючие:
керосин, с расходом до 20 г/с, метан (газообразный), с расходом до 15 г/с;

- разработка системы управления стендом;

- разработка системы измерений расходов, давлений, температур и тяги двигателей с требуемой частотой опроса датчиков;

- разработка системы безопасности стенда.

Перечисленные выше компоненты, выбранные для работы на данном стенде, не токсичны, не разлагаются (кроме ВПВ: продукт разложения – кислород и вода), не требуют особых условий хранения, стабильны. Используются несамовоспламеняющиеся пары компонентов: керосин и ВПВ, керосин и кислород, метан и кислород, метан и ВПВ. Данный фактор имеет положительную и отрицательную стороны:

- с точки зрения безопасности является плюсом, так как при смешении окислителя и горючего, при нормальных условиях и без дополнительной энергии, данная смесь не воспламеняется, тем самым снижается вероятность взрывоопасной ситуации;

- с точки зрения усложнения конструкции является минусом, так как появляется необходимость в использовании дополнительных источников энергии для воспламенения компонентов (калильное, катализационное, электроискровое зажигание).

Огневой стенд оснащен приточно-вытяжной вентиляционной системой с возможностью ежеминутной замены объема газа в огневом боксе после запуска двигателя.

Программа испытаний разработана совместно со специалистами ФКП «НИЦ РКП» по методикам, применяемым при проведении испытаний ЖРД [2].

Основными особенностями работы нового стенда являются:

1. Возможность работы на импульсных режимах тяги с фиксированием нестационарного значения тяги с применением силоизмерительного устройства (СИУИ). СИУИ предназначено для закрепления на нем испытываемой камеры сгорания (КС) с трубопроводами подачи компонентов топлива; уравнивания вектора тяги, создаваемого КС при огневых стендовых испытаниях (ОСИ); передачи осевой составляющей вектора тяги на динамометры, входящие в схему уравнивания тяги по главной оси СИУИ; прямого измерения текущих значений импульсной силы тяги при импульсных циклических испытаниях КС. Силоизмерительное устройство в совокупности с измерительно-вычислительным комплексом обеспечивает прямое определение измеряемой силы тяги КС с коррекцией значений измеренных усилий от влияния факторов, действующих на СИУИ-1500 в ходе ОСИ КС.

Уравнение равновесия подвижной части СИУИ-1500 при испытании КС имеет вид

$$F_{об} = F_{МКС} + F_p + F_{пт} + F_o + F_r, \quad (1)$$

где $F_{МКС}$ – измеряемая реактивная сила тяги модельной камеры сгорания; $F_{об}$ – исходно задаваемая нагрузателем сильфонным образцовая сила, по показаниям датчика ДО; F_p – сила реакции динамометра рабочего ДР; $F_{пт}$ – суммарная сила реакции подвесок гибких; F_o – сила реакции трубопровода подачи окислителя; F_r – сила реакции трубопровода подачи горючего.

Уравнение равновесия подвижной части при градуировке СИУИ-1500 ($F_{МКС}=0$) имеет вид

$$F_{обг} = F_{рг} + F_{птг} + F_{ог} + F_{рг}, \quad (2)$$

где $F_{обг}$ – задаваемая при градуировке образцовая сила, по показаниям ДО; $F_{рг}$ – сила реакции динамометра рабочего при градуировке; $F_{птг}$ – сила реакции подвесок гибких при градуировке; $F_{ог}$ – сила реакции трубопровода подачи окислителя при градуировке; $F_{рг}$ – сила реакции трубопровода подачи горючего при градуировке.

Из уравнения (2) определяется функция потерь (сумма сил реакций связей) при градуировке:

$$F_{птг} + F_{ог} + F_{рг} = F_{обг} - F_{рг}. \quad (3)$$

Так как жесткость связей на несколько порядков ниже жесткости динамометра ДР и подвижной рамы, а расхождение сил реакций при испытании и градуировке несущественно, уравнение (1) с учетом уравнения (3) можно записать в виде

$$F_{об} = F_{МКС} + F_p + F_{обг} - F_{рг}, \quad (4)$$

откуда значение измеряемой силы тяги определяется выражением

$$F_{МКС} = F_{об} - F_p - (F_{обг} - F_{рг}), \quad (5)$$

которое и является уравнением измерения СИУИ-1500.

2. Автоматизированная система управления стендом, сбора и обработки данных

Системой управления называется комплекс устройств, посредством которых осуществляется запуск, останов, изменение режимов работы, контроль параметров, аварийный останов двигателя [1].

Система управления выполняет следующие основные функции:

- автоматический запуск и останов двигателя по заданной циклограмме;
- автоматический контроль за основными параметрами двигателя, а при достижении ими критических значений – аварийный останов по заданной программе;
- автоматическое изменение режимов работы двигателя;
- автоматическое управление стендовыми клапанами, поддержание заданных давлений наддувов и продувок;
- автоматический контроль наличия компонентов в стендовых баках;
- автоматический контроль целостности электрических цепей двигателя;
- выдачу временных команд;

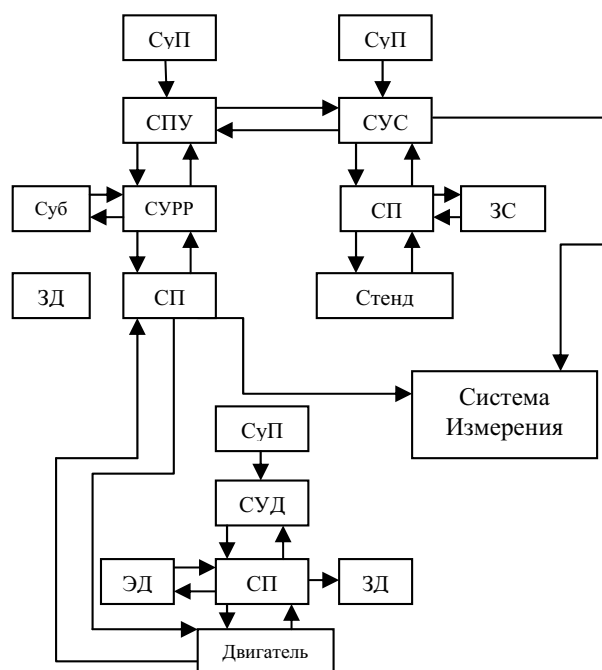


Рис.1. Функциональный состав системы управления огневого стенда

- ручное управление стендом при подготовке к испытанию и во время испытаний.

Система управления разбита на подсистемы, жестко связанные между собой, но решающие свои задачи (рис. 1). Связь всех подсистем осуществляется через систему программных устройств (СПУ). СПУ определяет программу работы, собирает сигналы о готовности подсистем, выдает команды, которые преобразуются в системе управления стендом (СУС), в системе управления регулятором расхода (СУРР), в системе управления двигателем (СУД) и через систему переключений (СП) передаются для исполнения на агрегаты стенда и двигателя. При необходимости СП коммутирует эти команды на эквиваленты стенда (ЭС) и двигателя (ЭД). Сигналы обратных связей, которыми охвачена вся система управления, с датчиков через СП коммутируются в СУС, СУД, СУРР, где корректируются командные сигналы подсистем. Все подсистемы выдают сигналы на запись в систему измерения (СК), в задачу которой входит и контроль целостности электрических цепей двигателя. Все необходимое питание в систему управления выдается с помощью комплекса взаимосвязанных блоков, образующих систему питания (СуП).

3. Система измерения на современных датчиках

В систему измерения входят следующие датчики:

- 1) расходомеры;
 - а) кориолисовые массовые расходомеры (Bronkhorst High-Tech IN-FLOW) [3];

- б) турбинные расходомеры (Hoffer Flow Controls);
- в) термомассовые расходомеры (Bronkhorst High-Tech IN-FLOW);
- д) дифференциальные расходомеры;
- 2) датчики давления:
 - а) тензометрические (ЗАО ОРЛЭКС, Sensys Corp[4]);
 - б) пьезоэлектрические (НИИ ФИИ г. Пенза);
- 3) термометры сопротивления для определения температуры компонентов и конструкции;
- 4) датчики тока клапанов.

В таблице представлен список измеряемых параметров. Для измерения давления используются два типа датчиков:

- 1) высокочастотные (1000 Гц), но с большой ошибкой (0,5%);
- 2) низкочастотные (1-10 Гц), но с высокой точностью (0,03%).

4. Система видеотрансляции и внедрение на ее основе вебинаров

Для видеозаписи и видеотрансляции закуплены и проверены на работоспособность веб-камеры высокого разрешения (8 МП), также идут работы по настройке видеосервера и локальной сети.

Описание пневмогидравлической схемы испытательного стенда.

В ПГС (рис.2) вошли такие подсистемы, как:

1. Магистраль воздуха высокого давления (ВВД). Состоит из 4 баллонов высокого давления

Таблица измеряемых и регистрируемых параметров

Наименование параметра, условное обозначение, единица измерения	Диапазон измерения	Погрешность измерения	Частота регистраций, Гц
Давление в камере сгорания, p_K , кгс·см ⁻²	1...20	± 0,5 %	1—10
		± 6 %	1000
Давление наддува расходного бака окислителя, p_{60} , кгс·см ⁻²	1...25	± 0,03 %	1—10
Давление наддува расходного бака горючего, $p_{6Г}$, кгс·см ⁻²	1...20	± 0,03 %	1—10
Давление окислителя на входе в двигатель, $p_{вх о}$, кгс·см ⁻²	1...25	± 0,03 %	1—10
		± 0,5 %	1000
Давление горючего на входе в двигатель, $p_{вх Г}$, кгс·см ⁻²	1...20	± 0,5 %	1—10
		± 0,05 %	1000
Давление окружающей среды, p_{oc} , мм рт. ст.	730...780	± 1 %	—
Расход окислителя, г·с ⁻¹	0 ...60	± 0,5 %	500
Расход горючего, г·с ⁻¹	0 ...36	± 0,5 %	500
Температура окислителя на входе в двигатель, $T_{вх о}$, К	278...398	± 2,5 %	10
Температура горючего на входе в двигатель, $T_{вх Г}$, К	278...398	± 2,5%	10
Температура конструкции, $T_{констр}$, К	273...1373	± 50	1—10
Ток клапана О, i_O , А	0...0,5	± 0,03	1000
Ток клапана Г, i_G , А	0...0,5	± 0,03	1000
Напряжение питания клапанов, U , В	0...30	± 2 %	1000

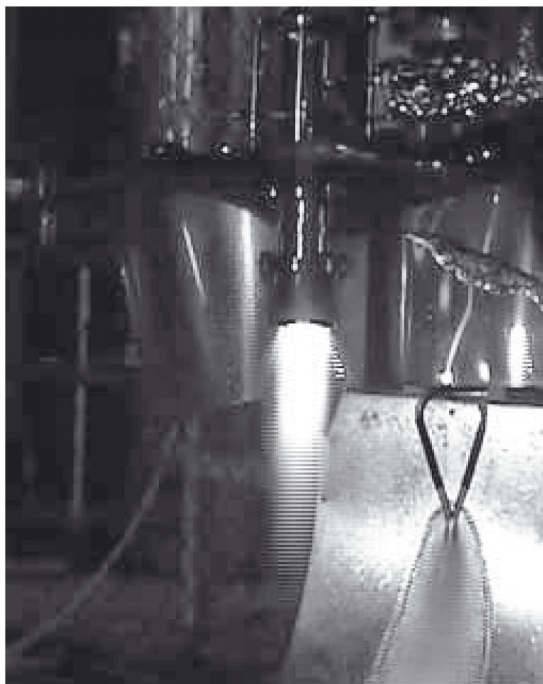


Рис. 3. Испытания ЖРД МТ на стенде кафедры «Ракетные двигатели»

(200 атм). На стенде используется рабочее давление воздуха (50 атм). ВВД служит для управления пневматическими клапанами магистралей.

2. Магистраль подачи газообразного кислорода. Состоит из 6 баллонов (140 атм) Подача кислорода на двигатель осуществляется посредством пневмоклапана, срабатывающего при давлении 50 атм, создаваемом ВВД, который подается через электропневмоклапан (ЭПК)

3. Магистраль подачи ВПВ основана на вытеснительной системе. Наддув компонента осуществляется азотом, который, в свою очередь, управляется ВВД.

4. Блок ЭПК состоит из электропневмоклапанов, которые управляют подачей ВВД на клапана.

5. Пульт является головным центром, служащим для обработки, сбора и передачи данных.

6. Рабочий участок. Там непосредственно расположены двигатель, СИУИ.

7. Магистраль подачи керосина. Подача компонента, так же как и ВПВ, осуществляется системой вытеснения.

8. Магистраль подачи метана.

9. Магистраль воды высокого давления. Служит средством аварийного пожаротушения и для проведения гидравлических испытаний (гидроопрессовка, проливки, продувки и т.д.).

На данный момент проведены следующие работы:

- 1) опрессовки магистралей;
- 2) газовые продувки;

- 3) технологические пуски;
- 4) огневые испытания систем зажигания ЖРД МТ (рис. 3);

5) полностью отлажено ручное управление стендом;

6) проходит тестирование и настройку автоматизированная система управления;

7) протестирована система регистрации данных с датчиков давления, тока и напряжения и расходов;

8) полные огневые испытания двигателя без СИУИ.

Заключение

1. Модернизирован огневой стенд кафедры:

1) выполнен монтаж системы питания газообразным кислородом, ВПВ, керосином, метаном;

2) заменена система вентиляции огневого бокса;

3) внедрены современный измерительно-вычислительный комплекс и автоматизированная система управления стендом.

2. Выполнены первоэтапные исследования по контрактам с отечественными и зарубежными организациями (НПО «Энергомаш», ЧНУ – Южная Корея, ПАКУ – КНР), связанные с созданием перспективных ЖРД МТ на экологически чистых КРТ.

3. Огневой стенд используется в учебном процессе в качестве лабораторной базы по специальностям «Ракетные двигатели» (экспериментальное исследование тяговой характеристики ЖРД) и «Инженерная защита окружающей среды» (эффективность перевода ЖРД с токсичных на экологически чистые компоненты топлив).

4. Продолжены работы по использованию огневых экспериментов, проводимых в реальном времени, для дистанционных учебных и лабораторных занятий посредством передачи информации по локальной сети и сети Интернет.

Библиографический список

1. Пухов В.А., Чучеров А.И. Стендовые огневые испытания ЖРД. –М.: Изд-во «Машиностроение», 1971.

2. Жуковский А.Е., Кондрусев В.С. Испытание жидкостных ракетных двигателей. –М.: Изд-во «Машиностроение», 1981.

3. www.massflow.ru

4. <http://www.sensys.co.kr>

Московский авиационный институт
(государственный технический университет)