

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВНУТРИКАМЕРНЫХ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ

© 2011 А. Н. Первышин, А. И. Рязанов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Стендовые испытания имеют определяющее значение при создании и доводке ракетных двигателей малой тяги и аналогичных им по рабочему процессу газогенераторов прикладного, наземного применения. Высокие требования к современным инновационным изделиям распространяются на все оборудование, участвующее в разработке, в том числе и на стендовое.

Ракетный двигатель, расход компонентов топлива, давление в ракетной камере, коэффициент избытка окислителя, автоматизация, стенд.

С целью усовершенствования конструкции ракетных двигателей, систем подачи топлива и других частей ракетных установок, а также для проверки качества работы они должны быть подвергнуты испытаниям. Только теоретическое исследование и проектирование не в состоянии обеспечить доводку разрабатываемого двигателя. Ракетные двигатели и различные основные части всей установки проходят ряд испытаний, преобладающую роль в которых играют:

1. Испытания под давлением на предмет выявления течей сварных швов, качества сборки трубопроводов и других соединений, в которых возможна течь.

2. Функциональные испытания для проверки правильности работы отдельных элементов неработающего двигателя, такие как испытания подачи топлива, действия клапанов.

3. Стендовые испытания работающего двигателя с целью проверки правильности работы и характеристик двигателя.

Стендовое оборудование лаборатории ОНИЛ-2 Самарского государственного аэрокосмического университета позволяло выполнять все перечисленные виды работ. Проводились исследования как ракетных двигателей малой тяги, так и обладающих аналогичным рабочим процессом газогенераторов прикладного, наземного применения, например металлаторов [2]. Была возможность проводить холодные и огневые пуски с замером давления в камере сгорания, входного давления окислителя и его темпе-

ратуры. Рассчитывался расход окислителя. Для определения расхода горючего проводились замеры времени истекания фиксированной массы газа из баллона. Для приближенного задания расхода горючего проводился замер его входного давления. Такой подход к организации испытаний обладал рядом существенных недостатков:

1. Проведение единичного огневого пуска и обработка результатов занимали около получаса и требовали работы еще 2-3 человек, помимо оператора стенда.

2. Полученные результаты являлись осредненными по нескольким минутам работы двигателя.

3. Выход на режимную точку требовал многократных повторных пусков с итеративным подбором давлений.

Приведенные недостатки стендовых систем приводили к существенной трудоемкости, а порой и невозможности выполнения исследований в полном объеме.

Неравномерная, рывкообразная подача проволоки в камеру сгорания при испытаниях металлатора [2] приводит к значительной нестабильности горения компонентов и режима истечения продуктов сгорания, а значит и к нестабильности процесса плавления напыляемого материала, его осаждению на деталь. Подача проволоки с постоянной скоростью исключит этот фактор, вносящий неоднородность в структуру покрытия.

Отсутствие обратных связей в системе стенда не позволяет оператору достаточно точно обеспечивать заявленные расходы го-

рючего и окислителя. Отклонения расхода топлива и коэффициента избытка окислителя приводят к уходу от заданных циклограммой испытаний режимов. Требуемые расходы достигаются путем итеративного подбора к 5 .. 12-му огневому пуску. Учитывая время пуска и обработки результатов не всегда удавалось получить одну экспериментальную точку в течение рабочего дня.

Возникла необходимость решения следующих задач:

1. Обеспечить непрерывную равномерную подачу проволоки в металлизатор и замер скорости ее подачи.

2. Определять мгновенные расходы компонентов топлива и давление в камере сгорания.

С целью решения поставленных задач проведена модернизация стенда (рис. 1) включающая создание устройства подачи проволоки, автоматизацию системы измерений и первичного анализа экспериментальных данных. Для возможности двойного контроля работы стенда были частично сохранены старые системы: манометры давления на входе компонентов топлива и в камере сгорания, термопара для замера температуры окислителя.

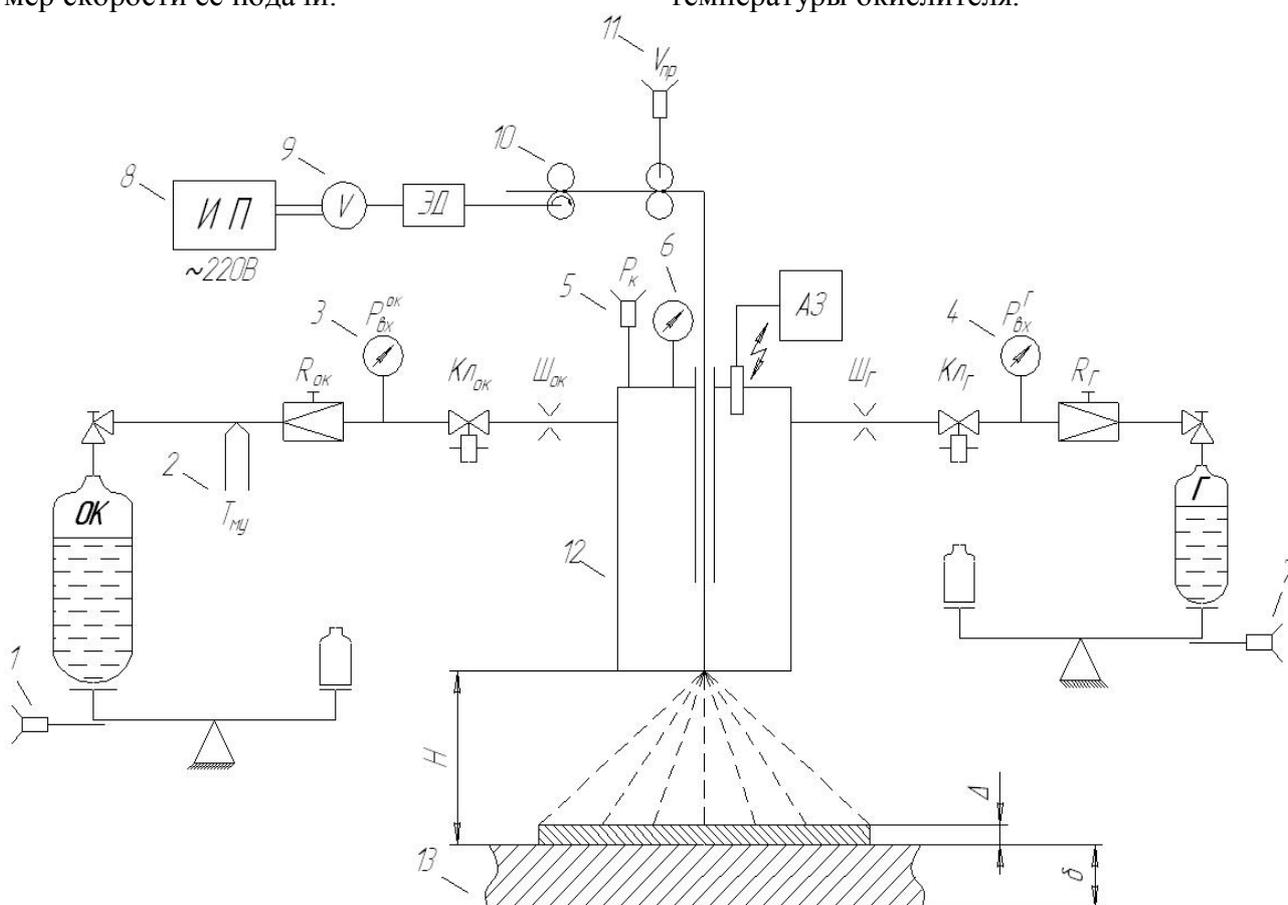


Рис.1. Пневмогидравлическая схема стенда:

1 – датчик усилия баллона окислителя, позволяет определить вес баллона в каждый момент времени t_{OK} ;
 2 – ХК КСП-4 (0...100° С) для замера температуры $T_{МУ}$; 3 – манометр образцовый для замера давления на окислителя на входе в камеру сгорания $P_{вх}^{ок}$; 4 – манометр образцовый для замера давления на горючего на входе в камеру сгорания $P_{вх}^Г$; 5 – манометр образцовый класса точности 0.16 с диапазоном измерения 0–6 ати на сто делений для замера давления в камере сгорания $P_к$; 6 – датчик относительного давления для замера давления в камере сгорания $P_к$; 7 – датчик усилия баллона горючего, позволяет определить вес баллона в каждый момент времени $t_Г$; 8 – блок питания на 220В ВСА-5А; 9 – вольтметр В7-22А; 10 – питатель проволоки; 11 – датчик оборотов примыкающего к проволоке колеса для определения скорости подачи проволоки $V_{пр}$; 12 – устройство ПВМ-1, 13 – контрольная пластина Ст.3

Система подачи проволоки и замера скорости представлена на рис. 2. От общей электросети через блок питания приводится в движение электродвигатель. Регулирование оборотами двигателя осуществляется напряжением от блока питания. Текущее напряжение контролируется по вольтметру. Проволока зажимается между двумя валика-

ми. Электродвигатель вращает ведущий валик и проталкивает проволоку. Жесткость поджимающей пружины регулируется гайкой. От устройства подачи проволока движется по направляющим трубкам и поступает в металлизатор через центральное (проволочный питатель) тело по оси камеры сгорания.

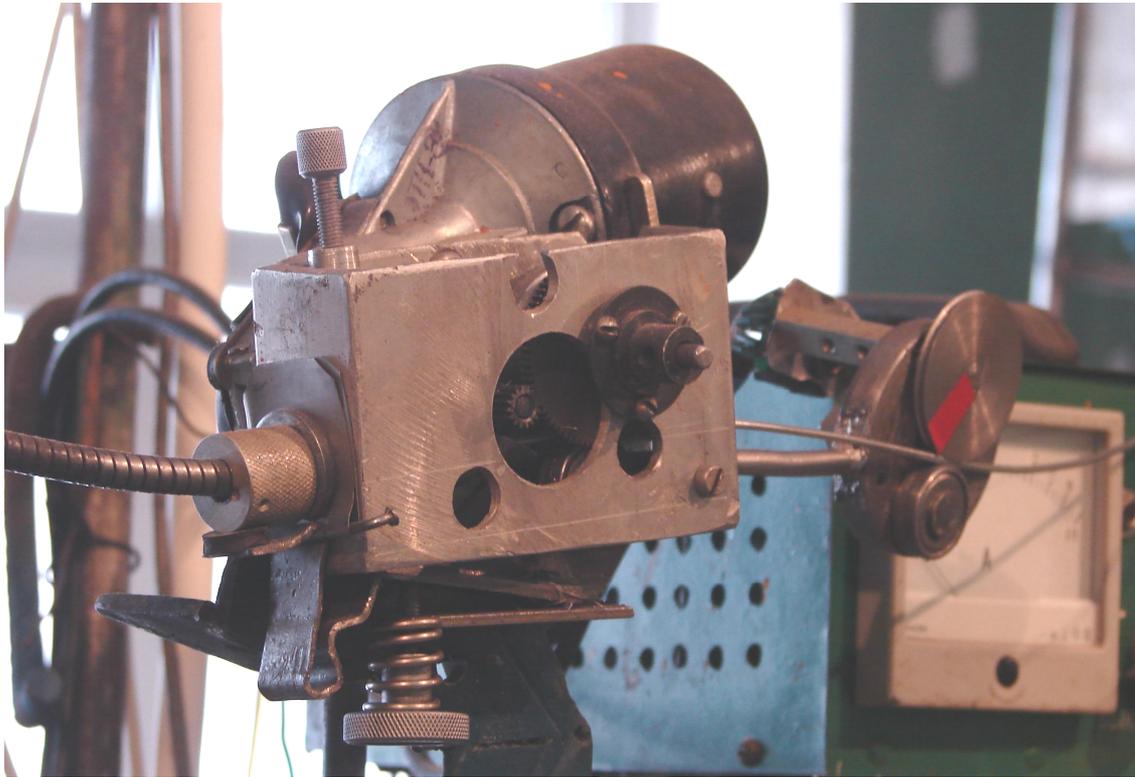


Рис. 2. Система подачи проволоки и замера скорости

Перед входом в систему подачи контролируется скорость движения проволоки. Прижатый к проволоке вал вращает датчик угла поворота. Данные передаются на ЭВМ для расчета мгновенной скорости подачи проволоки. Погрешность измерения не превышает 17% для скоростей выше 15 мм/с.

Расходы компонентов топлива определяются весовым методом. Используются датчики усилия, определяющие силу давления баллонов с газами – вес баллонов (см. рис. 2).

Замер давления в камере сгорания выполняется с помощью датчика относительного давления P_K .

Система измерений и первичного анализа экспериментальных данных, представленная на рис. 3, включила в себя следующие датчики: угла поворота вала, прижатого

к проволоке (ДУП), относительного давления P_K , усилия давлений баллонов окислителя F_{OK} и горючего F_G . С датчиков аналоговый сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Для каждого датчика предусмотрен свой АЦП, расположенный в непосредственной близости от средства измерения.

Такая схема позволяет минимизировать искажение аналогового сигнала при его передаче по протяженным проводам на плату сбора данных. К плате подходит цифровой сигнал, слабо подверженный влиянию электромагнитных фоновых полей. Плата сбора данных передает результаты замеров на ЭВМ ПК через usb-интерфейс. Передача данных происходит по запросу программы «СТЕНД» с частотой 10 Гц. Программное обеспечение «СТЕНД», созданное в среде

программирования Delphi 7, позволяет осуществлять первичный анализ экспериментальных данных. Поступив в программу, данные декодируются из двоичного кода и переводятся в Международную систему единиц измерения СИ. Производится пер-

вичный анализ: по углу поворота и времени между замерами, рассчитывается скорость подачи проволоки $V_{\text{пр}}$, по изменению массы и времени находят расходы компонентов топлива $m_{\text{ок}}$, $m_{\text{г}}$.

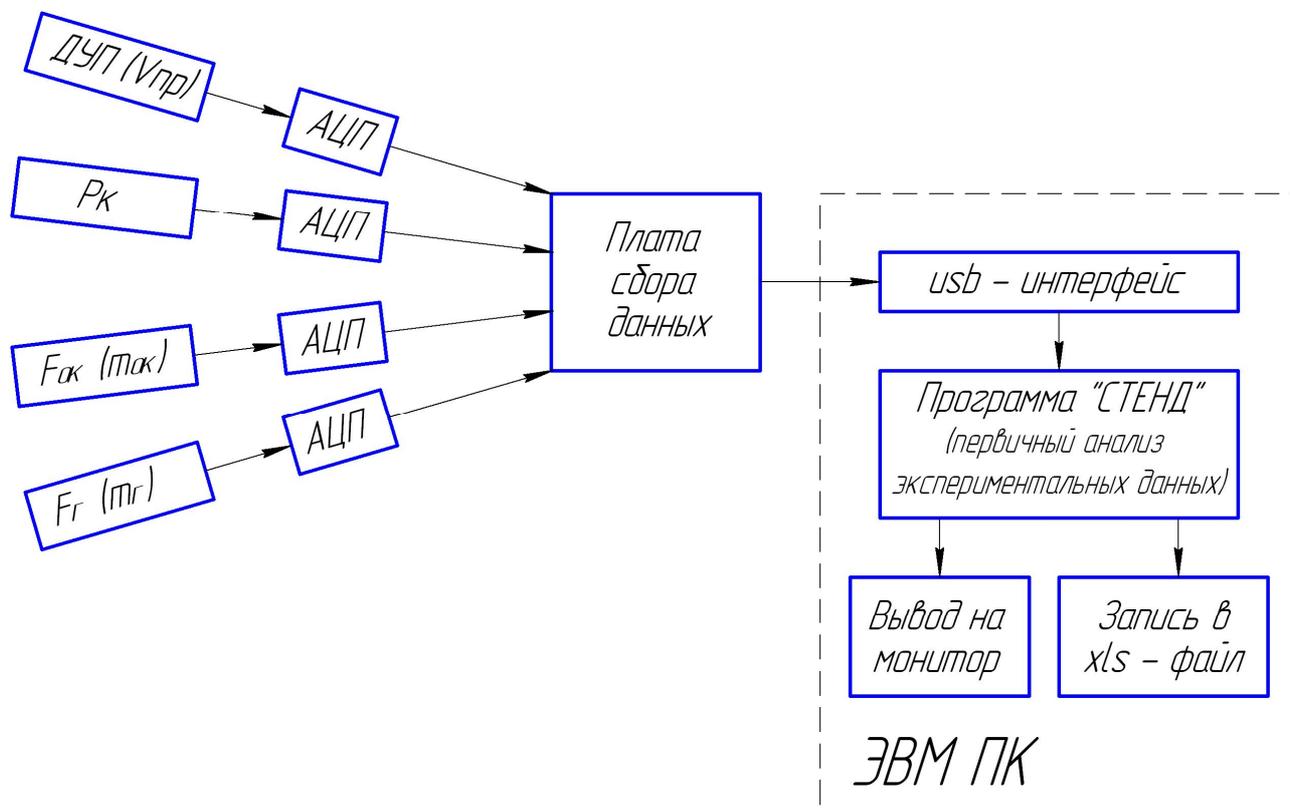


Рис. 3. Система автоматизированного сбора и первичного анализа экспериментальных данных

В ходе подготовки к испытаниям проводилась тарировка всех датчиков. В результате тарировки выявлены поправочные коэффициенты, позволяющие минимизировать систематическую погрешность измерительных систем. Программное обеспечение предусматривает возможность учета этих коэффициентов при обработке результатов замеров. Значения коэффициентов необходимо ввести в соответствующую форму программы «СТЕНД».

Форма коррекции исходного сигнала датчика описывается формулой: $y = a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x + a_3$, где $a_1..a_3$ - поправочные коэффициенты; x - сигнал, пришедший с датчика; y - откорректированное значение для вывода на монитор. В случае отсутствия тарировки значения коэффициентов задаются следующими значениями: $a_1 = 0$, $a_2 = 1$,

$a_3 = 0$. Тогда уравнение вырождается в $y = x$.

Во время работы генератора на мониторе в режиме реального времени отображаются измеряемые параметры и некоторые расчетные, такие как коэффициент избытка окислителя $\alpha_{\text{ок}}$ и коэффициент полноты сгорания $\varphi_{\text{в}}$. Результаты отображаются как в виде числовых значений, так и в виде столбцового индикатора. Три параметра на выбор можно вывести в виде графиков изменения их величины по времени.

Протоколирование показаний всех датчиков и расчетных величин с частотой 10 раз в секунду осуществляется в xls-файле. В правый столбец xls-файла пишется дата проведения эксперимента. В следующем столбце сохраняется текущее время в секундах. Каждый из последующих столбцов соответствует одному измеряемому параметру или

расчетной величине. Каждая строка файла – это мгновенный срез состояния объекта испытаний.

Модернизация стенда и переход к автоматизированной системе сбора и первичного анализа экспериментальных данных позволили решить поставленные задачи:

1. Обеспечить непрерывную равномерную подачу проволоки в металлатор и замер скорости ее подачи.

2. Определять мгновенные расходы компонентов топлива и давление в камере сгорания.

В результате появилась возможность проводить испытания на стенде не только классических ракетных двигателей малой тяги, но и родственных им устройств наземного применения.

Автоматизация стенда имела еще ряд преимуществ:

1. Сократилось количество персонала, задействованного в проведении испытаний. Снятие и протоколирование показаний происходит автоматизированно и не требуют размещения людей напротив шкалы каждого измерительного прибора. Достаточно присутствия на стенде оператора стенда и оператора ЭВМ.

2. Рост производительности испытаний, обусловленный режимом сокращением количества времени на подготовку и проведение огневых пусков. Появилась возможность за один пуск делать не однократный замер параметров, а отслеживать их текущее состояние с высокой частотой, что позволяет настраиваться на режим в процессе однократного пуска генератора. Теперь исключается ручное протоколирование результатов замеров. Запись единичного замера параметров занимает менее 0.01 секунды. Время на первичную обработку результатов также сокращается в разы.

3. Повышение экономичности расхода компонентов топлива и проволоки. Обусловлено тем, что тот же объем испытаний выполняется за на порядок меньший объем времени работы генератора.

4. Повышение точности и частоты получаемых данных. Практически исключаются промахи, определение значения на глаз по шкале, задержка по времени между фиксированием показаний разных приборов и т.д. Большое количество статистических данных позволяет делать более адекватные выводы о протекающих процессах.

Испытания опытного пропановоздушного проволочного металлатора показали его работоспособность и высокую производительность [2]. Экспериментальные данные подтвердили адекватность математической модели [1].

Данная работа продемонстрировала невозможность создания инновационного инструмента металлизации без современного испытательного оборудования и показала пример применения передовых космических технологий в прикладных отраслях национальной экономики.

Библиографический список

1. Рязанов, А.И. Оценка интенсивности теплообмена между стержнем и рабочим телом в камере сгорания РДМТ [Текст] / А.И. Рязанов // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та – Самара: СГАУ, 2006. – Ч.1. - С.166.

2. Первышин, А.Н. Экспериментальное исследование генератора сверхзвуковых струй для напыления покрытий [Текст] [Текст] / А.Н. Первышин, А.И. Рязанов // Изв. Самар. науч. центра Российской академии наук – Самара: изд-во Самарского научного центра Российской академии наук, 2008. - С 80-84.

TEST BENCH FOR INVESTIGATION OF THRUSTERS INTRA-CHAMBER WORKING PROCESSES

© 2011 A. N. Pervyshin, A. I. Ryazanov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Experimental investigations have governing importance during the creation and development of thrusters and other gas generators of similar working process for ground application. All modern innovation equipment used for design and development, including test equipment, must satisfy strong requirements.

Rocket engine, fuel components consumption, rocket engine chamber pressure, oxidizer surplus ratio, automation, test bench.

Информация об авторах

Первышин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механической обработки материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: mom@ssau.ru. Область научных интересов: прикладное применение ракетных двигателей.

Рязанов Александр Ильич, ассистент кафедры механической обработки материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tr05@bk.ru. Область научных интересов: прикладное применение ракетных двигателей.

Pervyshin Alexandr Nikolaevich, doctor of technical sciences, chief of the “Mechanical materials processing” department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: mom@ssau.ru. Area of research: ground application of rocket engines.

Ryazanov Alexandr Ilyich, junior member of teaching staff, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). “Mechanical materials processing” department. E-mail: tr05@bk.ru. Area of research: ground application of rocket engines.