

УДК. 621.454.3.018.3

А.С. Кириченко, И.Б. Бескровный, Р.Ю. Кривсун, В.В. Рогулин

ОПЫТ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО СТЕНДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ РДТТ

Приведена информация об опыте ГП «КБ «Южное» по проектированию и эксплуатации специального оборудования для экспериментальной отработки РДТТ различных классов, дано описание и анализ результатов эксплуатации этого оборудования.

Наведено інформацію про досвід ДП «КБ «Південне» з проектування й експлуатації спеціального обладнання для експериментального відпрацювання РДТТ різних класів, приведено опис та аналіз результатів експлуатації цього обладнання.

The information on Yuzhnoye SDO experience in designing and operation of special equipment for testing of SRM of various classes is presented, the description and analysis of results of this equipment operation are given.

Введение. Основным этапом наземной экспериментальной отработки (НЭО) ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) являются огневые стендовые испытания (ОСИ). Во время ОСИ определяются характеристики и параметры РДТТ, по которым оценивается их надежность и работоспособность. ОСИ проводят на испытательных стендах с использованием специального оборудования, которое является важной частью системы измерения параметров и характеристик двигателя.

Постановка задачи. Повышение надежности РДТТ существенно ужесточает требования к техническому оснащению испытательных стендов в части выполнения требований по объему, качеству и достоверности измерений при испытаниях, что напрямую зависит от выбранных конструктивных схем используемого испытательного оборудования.

Пути решения поставленной задачи. В решении поставленной задачи огромное значение имеет опыт, накопленный на ГП «КБ «Южное» по проектированию и эксплуатации различных конструктивных схем испытательного оборудования (стапелей и других технических средств испытаний), применяемого во время ОСИ как крупногабаритных, так и малогабаритных РДТТ.

Универсальный стапель для ОСИ крупногабаритных РДТТ. Важнейшей составляющей испытательного оборудования является стапель. Одной из основных задач, стоявших перед проектантами стапелей, предназначенных для ОСИ крупногабаритных РДТТ, было создание таких конструкций, которые наряду с закреплением РДТТ во время ОСИ на испытательном стенде обеспечивали бы и замер осевой тяги, боковых составляющих тяги и моментов крена.

Обобщая опыт по проектированию и эксплуатации ранее разработанных стапелей и учитывая положительно зарекомендовавшие себя технические решения по их отдельным узлам, была разработана конструктивная схема универсального стапеля для ОСИ крупногабаритных РДТТ [1]. Стапель обеспечивал качественный замер осевой тяги, боковых составляющих тяги и моментов крена при ОСИ целого ряда РДТТ массой до 70 т и тягой до 500 тс.

Стапель (рис. 1) представляет собой металлоконструкцию, состоящую из передней 13 и задней 1 балок со стойками 12. Балки 13, 1 содержат по четыре шаровых опоры 2, на которые установлены промежуточные балки 5, содержащие роликовые опоры 4. На роликовые опоры 4 установлены ложементы 3, скрепленные стяжками 14.

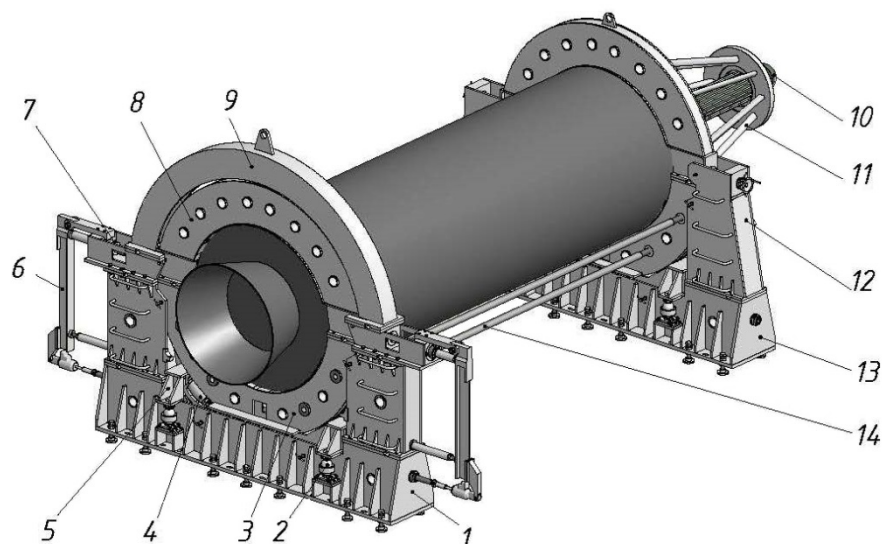


Рис. 1. Общий вид универсального стапеля для ОСИ крупногабаритных РДТТ:

1 – задняя балка; 2 – шаровая опора; 3 – ложемент; 4 – роликовая опора;
5 – промежуточная балка; 6 – приспособление для тарирования; 7, 10 – измерительные узлы;
8 – хомут; 9 – арка; 11 – конус; 12 – стойка; 13 – передняя балка; 14 – стяжка

Двигатель с установленными на нем конусом 11 и измерительным узлом 10, предназначенным для замера осевой тяги, укладывают в ложементы 3 и закрепляют хомутами 8. Для замера боковых составляющих тяги при испытании двигателя служат измерительные узлы 7, для замера момента крена – датчики момента крена.

В конструкции стапеля предусмотрены приспособления для тарирования 6 измерительных узлов 7 боковых составляющих тяги и датчиков моментов крена, а также приспособление для определения потерь осевой тяги при перемещении подвижной части стапеля.

Заложенные в конструкции универсального стапеля технические решения обеспечили:

1) работоспособность стапеля по всем системам измерений силовых параметров двигателей (осевой тяги, боковых составляющих тяги и моментов крена);

2) защиту датчиков осевой тяги и боковых составляющих тяги от изгибающих моментов;

3) учет потерь при измерении силовых параметров;

4) надежное крепление двигателя в стапеле;

5) универсальность стапеля.

Использование стапеля данной конструкции обеспечило проведение в пол-

ном объеме ОСИ большой номенклатуры крупногабаритных РДТТ с выполнением требований технических заданий по объему и точности измерения их силовых параметров.

Стендовое оборудование для ОСИ малогабаритных РДТТ. Среди РДТТ различных классов особую группу составляют малогабаритные двигатели, в частности импульсные двигатели, служащие для создания дозированного импульса силы (полного импульса тяги).

Следовательно, перед проектантами стояла задача по созданию такого оборудования, которое наряду с закреплением РДТТ на испытательном стенде при ОСИ обеспечивало бы и определение полного импульса тяги.

Полный импульс тяги двигателя при ОСИ может быть определен различными методами, например численным интегрированием кривой зависимости тяги от времени. При этом кривую зависимости тяги от времени получают опытным путем, измеряя тягу датчиком силы при испытаниях на стапеле.

При испытаниях РДТТ полный импульс тяги можно определить и без численного интегрирования кривой зависимости тяги от времени, используя маятник (рис. 2).

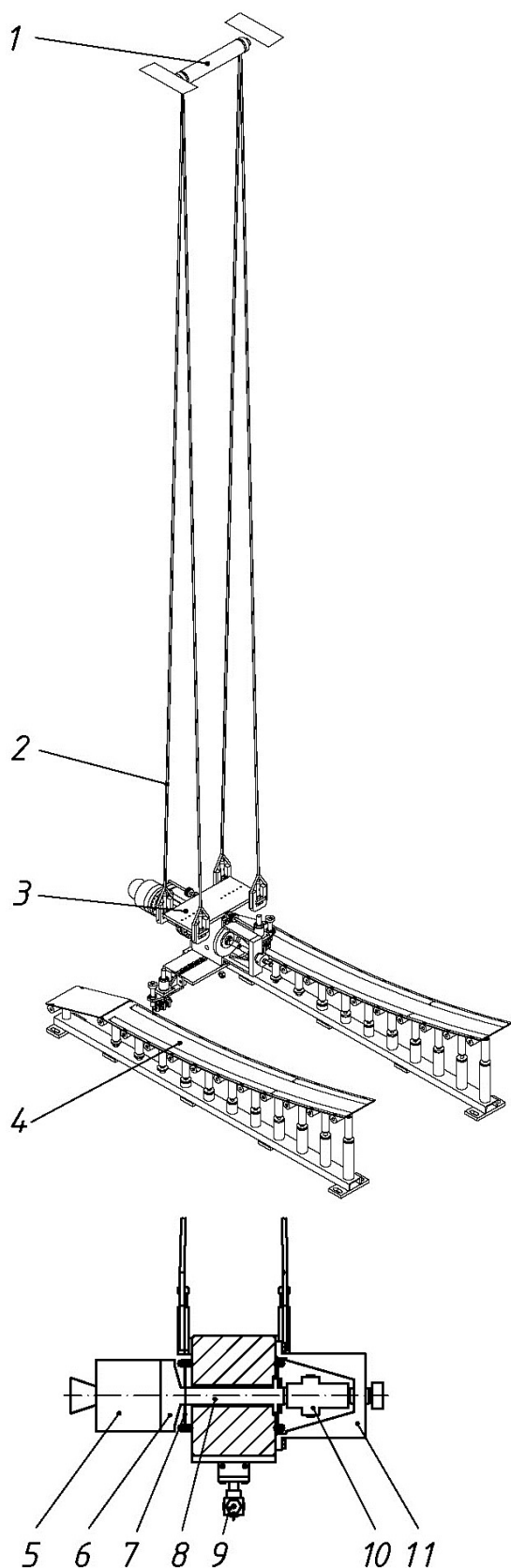


Рис. 2. Конструктивная схема маятника:
 1 – вал; 2 – трос подвески; 3 – подвижная часть;
 4 – дорожка; 5 – двигатель; 6 – переходник;
 7 – мембраны; 8 – шток; 9 – чертилка; 10 – датчик тяги; 11 – кронштейн

Маятник состоит из вала 1, закрепленного в верхней части испытательного бокса, двух дорожек 4, закрепленных на полу бокса, и подвижной части 3, подвешенной на четырех тросах подвески 2 к валу 1.

Подвижная часть 3 маятника состоит из платформы, на которую крепятся сменные грузы. В платформе через центр ее тяжести в плоскости качания подвижной части 3 выполнено сквозное отверстие, в котором установлен шток 8, закрепленный с возможностью перемещения на двух мембранах 7 относительно платформы. С одной стороны на шток 8 через переходник 6 устанавливается испытываемый двигатель 5, с другой – датчик тяги 10, который упирается в кронштейн 11, закрепленный на платформе. Таким образом, полный импульс тяги испытываемого двигателя воздействует на подвижную часть маятника через переходник 6, шток 8 и датчик тяги 10.

Платформа в местах крепления к тросам подвески 2 имеет устройство, обеспечивающее регулировку положения подвижной части 3 относительно дорожек 4. Для исключения влияния случайных возмущающих факторов на подвижную часть маятника 3, например ветра, она стопорится фиксатором, который при первом отклонении подвижной части складывается. Кабели системы управления и измерения подводятся к двигателю 5 от вала 1 по тросам подвески 2. Установка на маятник двигателей различного конструктивного исполнения и датчиков тяги различного номинала обеспечивается соответствующими переходниками [2].

При отклонении подвижной части маятника под действием полного импульса тяги закрепленные по обеим сторонам платформы чертилки 9 наносят линии на листах дорожек 4, покрытых тонким слоем графитовой смазки. После двух качаний подвижной части чертилки 9 отводятся от дорожек 4 с помощью электромагнитов.

Длину линий (дуги отклонений) измеряют с помощью линеек, закрепленных на дорожках 4.

Отклонение подвижной части маятника описывается обычными уравнениями гео-

ретической механики, решения которых позволяют определить полный импульс тяги J испытываемого двигателя. В первом приближении полный импульс тяги J определяется по формуле

$$J \approx \frac{QTa}{2\pi l},$$

где Q – вес подвижной части, кгс;

T – период колебаний маятника, с;

a – длина дуги отклонения, мм;

l – расстояние от оси вала до дорожки, мм.

При испытаниях импульсных двигателей, конструкция которых не предусматривает установку датчиков давления, их временные характеристики определяют по показаниям датчика тяги, специально установленного на маятниках.

Показания датчика тяги маятников могут быть использованы и для определения полного импульса тяги. Для этого к значению полного импульса тяги, вычисленного методом численного интегрирования кривой зависимости тяги от времени по показаниям датчика тяги, необходимо добавить поправку, вычисленную по формуле, в которой Q есть суммарный вес деталей подвижной части маятника, силу инерции которых не регистрирует датчик тяги (детали 5, 6, 8, 10).

Отметим, что маятники в полном объеме обеспечили проведение отработки большого ряда импульсных двигателей с достаточной степенью точности определения полного импульса тяги.

Однако следует отметить и то, что маятники являются громоздкими, сложными в обслуживании стендовыми устройствами, требующими специальных капитальных сооружений для их монтажа, длительного времени подготовки к испытаниям.

Указанные выше недостатки маятников отсутствуют у стапеля, так как стапель имеет малые габариты, прост в изготовле-

нии, надежен в эксплуатации и позволяет проводить измерения всего диапазона полных импульсов тяги без ограничений, используя датчики силы соответствующих номиналов.

Очевидно, что при использовании стапелей для испытаний импульсных двигателей точность определения полного импульса тяги зависит от точности используемого датчика силы и степени влияния конструкции стапеля на точность измерения тяги.

Следовательно, задача повышения точности измерения тяги при испытаниях импульсных РДТТ с применением стапелей может быть успешно выполнена при использовании высокоточной системы измерений и устранении недостатков традиционно используемых конструктивных схем стапелей. Эти требования были учтены при создании для испытаний импульсных РДТТ стапеля с новой конструктивной схемой.

Стапель с новой конструктивной схемой, на которую получены патенты Украины [3, 4], состоит из тягоизмерительного узла и узла поджатия.

Тягоизмерительный узел (рис. 3) состоит из кронштейна 4 (базового элемента), на котором крепится датчик силы 2 для замера тяги и датчик силы 7 для замера усилия поджатия датчика тяги. При этом кронштейн 4 конструктивно выполнен так, что ось сопла двигателя 5, установленного на кронштейне 4, а значит, и вектор тяги двигателя 5 направлены по оси датчиков силы 2, 7.

Узел поджатия состоит из двух штанг 3, жестко закрепленных в горизонтальной плоскости на вертикальной плите 1 упора стенда, и траверсы 6, установленной с возможностью перемещения на штангах 3. В плоскости штанг 3 на вертикальной плите 1 упора стенда и траверсе 6 также установлены опоры с вогнутыми коническими поверхностями.

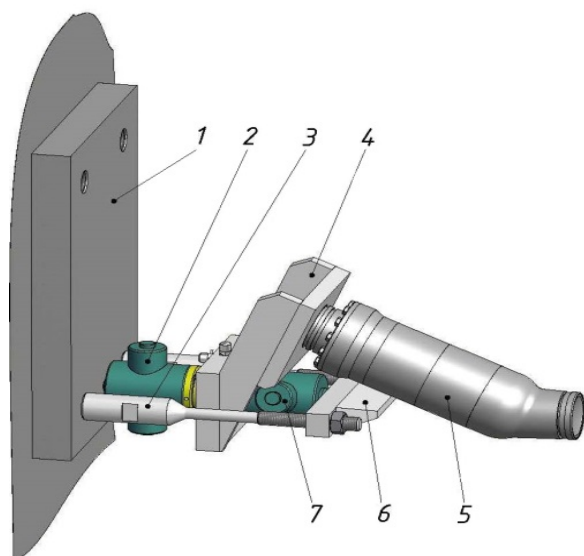


Рис. 3. Стапель с новой конструктивной схемой:

- 1 – плита; 2 – датчик тяги; 3 – штанга;
- 4 – кронштейн; 5 – двигатель; 6 – траверса;
- 7 – датчик замера усилия поджатия

При подготовке стапеля к эксплуатации тягоизмерительный узел выпуклыми сферическими опорными поверхностями датчиков силы 2, 7 устанавливается в соответствующие вогнутые конические поверхности опор и поджимается траверсой 6 с помощью гаек в сторону действия вектора тяги, создавая предварительное поджатие датчиков силы 2, 7, установленных в тягоизмерительном узле. Поджатие обеспечивает статическое крепление двигателя с тягоизмерительным узлом на вертикальной плите упора стенда, что устраняет зазоры в местах сопряжений составных частей стапеля и исключает перемещение составных частей стапеля относительно друг друга, кроме как в пределах их упругой деформации. Такое крепление двигателя позволяет при испытаниях более качественно определить методом сглаживания характер изменения тяги и ее максимальное значение.

В связи с упругой деформацией тягоизмерительного узла под действием тяги при испытании двигателя происходит изменение усилия предварительного поджатия датчиков силы, поэтому усилие предварительного поджатия контролируется в про-

цессе всего испытания и учитывается при определении тяги.

Стапель с новой конструктивной схемой был исследован при испытаниях импульсных РДТТ. Результаты исследований показали, что стапель обеспечил качественное измерение значения и характера изменения тяги, особенно на участке выхода двигателя на режим, что повысило точность определения полного импульса тяги.

Учитывая вышесказанное, а также малые габариты, простоту изготовления, надежность в эксплуатации стапеля с новой конструктивной схемой, можно сделать вывод о том, что он является перспективным не только для испытаний импульсных РДТТ, но и для испытаний малогабаритных РДТТ других классов.

Стендовое оборудование для имитации высотных условий работы РДТТ. Необходимо отметить, что НЭО высотных РДТТ имеет свои особенности. Так, для определения пустотных энергетических и тяговых характеристик, а также для оценки работоспособности сопла при ОСИ высотных РДТТ должна обеспечиваться имитация высотных условий работы двигателей (безотрывное истечение продуктов сгорания из сопла).

Следует иметь в виду, что создание надежного стендового оборудования для имитации высотных условий сопряжено с большими техническими трудностями, так как необходимо обеспечивать его высокую надежность и работоспособность в крайне жестких условиях воздействия струи высокотемпературных, химически активных продуктов сгорания.

На рис. 4 представлена конструктивная схема стендового оборудования, спроектированного для обеспечения имитации высотных условий при ОСИ крупногабаритных двигателей второй ступени, конструкцию которого во многом определили параметры испытываемых двигателей.

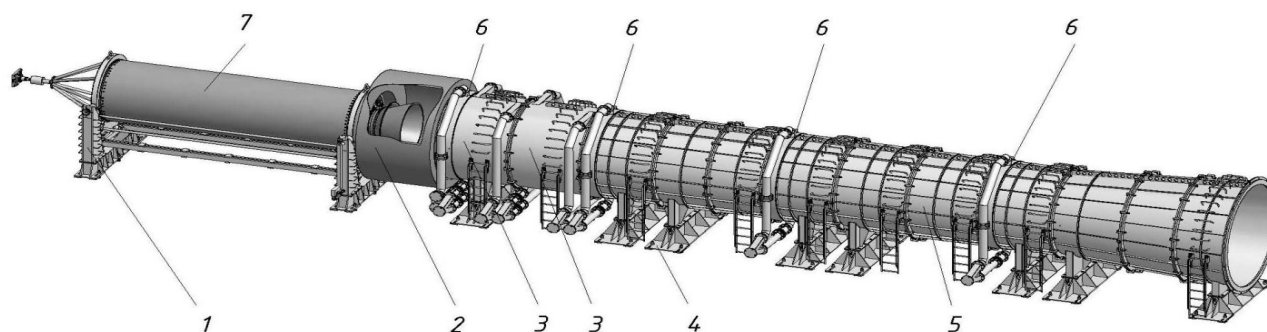


Рис. 4. Конструктивная схема стендового оборудования для испытаний двигателей второй ступени:

1 – стапель; 2 – малая барокамера; 3 – рубашки охлаждения; 4 – подставки; 5 – диффузор; 6 – узлы впрыска; 7 – двигатель

Стендовое оборудование состоит из малой барокамеры 2 и диффузора 5. Малая барокамера 2 представляет собой емкость, которая охватывает сопло и корпус двигателя 7 в районе заднего днища. Для обеспечения герметичности стыка корпуса двигателя 7 с малой барокамерой 2 установлена резиновая манжета, охватывающая корпус двигателя 7. На заднем фланце малой барокамеры 2 установлено переходное кольцо, выставляемое соосно соплу двигателя 7. Непосредственно к этому переходному кольцу пристыковывается диффузор 5, состоящий из цилиндров и конуса, установленных на подставки 4. Стыковка цилиндров и конуса осуществляется последовательно с помощью струбцин [5].

Использование при испытаниях малой барокамеры и диффузора позволило провести в полном объеме проверку работоспособности растрюба сопла, отработать его раскладку и определить пустотные энергетические и тяговые характеристики ряда двигателей второй ступени.

Основным узлом, обеспечивающим имитацию высотных условий, является диффузор, геометрические параметры которого определяют условия имитации. При его проектировании наряду с выбором геометрических параметров важным является также выбор принципиальной схемы защиты его стенок от прогаров. Для этого проводят расчет теплового потока в стенке диффузора и расчет их защиты от воздействия этого теплового потока.

Однако, как показала практика эксплуатации диффузоров, правильно выбранная принципиальная схема тепловой защиты стенок еще не гарантирует работоспособности диффузора. Многое зависит от конструктивного исполнения выбранной схемы, и почти всегда по результатам испытаний приходится уточнять конструктивные элементы диффузора, так как существует много факторов (например, К-фаза), присутствующих продуктам сгорания твердого топлива, оценить влияние которых на работоспособность диффузора расчетным путем затруднительно.

Защита стенок диффузора 5 от прогаров осуществляется водой, впрыскиваемой внутрь канала диффузора через четыре узла впрыска 6. Первый узел впрыска состоит из трубок, направляющих воду вдоль внутренней стенки диффузора. Последующие три выполнены в виде щелей, направляющих воду также вдоль внутренней стенки диффузора. Первые две цилиндрические части диффузора, как самые теплонапряженные, имеют свои проточные рубашки охлаждения 3. Четыре узла впрыска и рубашки охлаждения запитаны через гибкие трубопроводы от стационарной насосной системы, которая обеспечивает расход воды через первый узел впрыска ~ 250 л/с, последующие ~ 100 л/с и через каждую рубашку охлаждения по ~ 150 л/с.

Результаты испытаний показали, что на входном участке диффузора от воздействия продуктов сгорания образовывались локальные участки уноса металла стенки

диффузора, что при прогаре стенки могло создать аварийную ситуацию. В дальнейшем для повышения надежности работы системы охлаждения в первом узле впрыска диффузора трубки для подачи воды в пристеночное пространство были заменены косыми отверстиями. Это позволило повысить эффективность охлаждения стенок входного участка диффузора и существенно улучшить его тепловую стойкость, снизив температуру стенок диффузора при испытании до 300°C, что гарантировало высокую надежность и работоспособность стендового оборудования, обеспечивающего имитацию высотных условий при ОСИ РДТТ вторых ступеней.

Технические средства принудительного гашения ТЗП после окончания работы РДТТ. На этапе НЭО РДТТ одной из важных задач является также подтверждение оптимальности расчетных толщин внутреннего теплозащитного покрытия (ТЗП) корпуса по результатам проведения ОСИ. ТЗП корпуса является важным элементом конструкции, составляющим до 20% общего веса корпуса, поэтому оптимизация толщин теплозащитных покрытий позволяет повысить параметры конструктивного совершенства элементов РДТТ. При ОСИ РДТТ уточняются необходимые толщины ТЗП, оцениваются надежность функционирования теплонапряженных узлов и деталей, оцениваются температуры поверхностей защищаемых конструктивных элементов. Достоверность толщин ТЗП, опре-

деляемых после ОСИ, существенно зависит от эффективности средств фиксации состояния ТЗП на момент окончания работы двигателя, так как после него продолжается процесс горения, а следовательно, и коксование ТЗП.

В обычной практике для фиксации состояния ТЗП на момент окончания работы двигателя изолируют его полость по внутренней поверхности раструба сопла заглушкой, предотвращая попадание туда кислорода атмосферного воздуха, что исключает догорание ТЗП.

Более эффективным методом фиксации состояния ТЗП является активное воздействие на процесс охлаждения внутренней полости двигателя путем принудительного гашения ТЗП после окончания работы двигателя. На практике при разработке устройств и методик гашения независимо от вида огнетушащего вещества (ОТВ) весьма важным расчетным случаем является определение параметров гашения, которые зависят от объекта гашения, вида ОТВ и способа его подачи.

По результатам расчетов для объекта гашения – РДТТ с известным свободным объемом внутренней полости, заполненной продуктами сгорания и сообщаемой с атмосферой через критическое сечение сопла, была разработана установка для распыления жидких ОТВ.

Конструктивная схема установки [6] для распыления жидких ОТВ представлена на рис. 5.

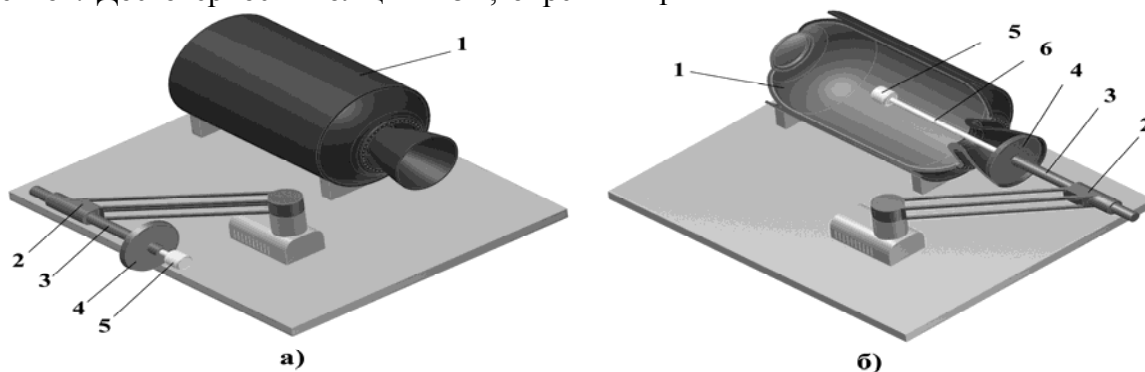


Рис. 5. Конструктивная схема установки для распыления жидких ОТВ:

а – исходное положение; б – рабочее положение; 1 – корпус двигателя; 2 – поворотная колонка;
3 – пневмоцилиндр; 4 – заглушка; 5 – распылительная форсунка; 6 – выдвижная труба

В установке применен принцип изоляции внутренней полости от внешней ат-

мосферы заглушкой и порционной подачи жидких ОТВ на горячие и тлеющие

поверхности внутренней полости корпуса. Жидкие ОТВ подаются под давлением ~ 20 кгс/см² и распыляются через систему форсунок, направленных к цилиндрической части, переднему и заднему днищам внутренней полости корпуса. Подача жидких ОТВ осуществляется в количествах, пропорциональных количеству аккумулярованного тепла во внутренней полости.

Установка монтируется в исходном положении на огневом дворе испытательного стенда вблизи стапеля и на момент окончания работы двигателя по команде оператора поворачивается в рабочее положение. При этом заглушка изолирует полость двигателя по внутренней поверхности раструба сопла, а распылительная головка на выдвижной трубе, которая одновременно является и поршнем пневмоцилиндра, подается во внутреннюю полость, и жидкое ОТВ под давлением сжатого азота впрыскивается через форсунки распылительной головки. После отбора тепла с внутренней полости и соответствующего снижения температуры осуществляется продувка внутренней полости азотом.

С помощью такой установки были проведены гашения ТЗП крупногабаритных РДТТ водой, при этом эффективность гашения жидким ОТВ в сравнении с другими ОТВ была дополнительно подтверждена убедительными экономическими соображениями, так как гашение водой на порядок дешевле, чем огнетушителями порошками и жидким азотом.

Заключение. Приведенная информация об опыте ГП «КБ «Южное» по проектированию и эксплуатации специального стендового оборудования и технических средств для ОСИ РДТТ может быть использована для дальнейшего совершенствования конструкций этого оборудования применительно к новым задачам наземной экспериментальной отработки и РДТТ различных классов.

Список использованной литературы

1. Кириченко А.С., Бескровный И.Б., Балицкий И.П. и др. Опыт предприятия

по проектированию и эксплуатации стапелей для испытаний РДТТ // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2008. – Вып. 1. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное». – С. 119 – 127.

2. Бескровный И.Б., Рогулин В.В., Лях Ю.А. и др. Выбор стендовых устройств для испытаний импульсных РДТТ // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2010. – Вып. 2. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное». – С. 63 – 70.

3. Пат. №79337 Україна МПК (2013) G01L 5/13. Стенд для виміру тяги ракетних двигунів на твердому паливі / І.Б. Бескровний, В.В. Рогулін, Р.Ю. Кривсун (Україна); заявник Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля. – № u201208987; Заявлено 20.07.2012; Опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.

4. Пат. №87331 Україна МПК (2014) G01L 5/13. Спосіб виміру тяги ракетних двигунів на твердому паливі / І.Б. Бескровний, В.В. Рогулін, Р.Ю. Кривсун (Україна); заявник Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля. – № u201305540; Заявлено 29.04.2013; Опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3.

5. Бескровный И.Б., Кириченко А.С., Балицкий И.П. и др. Особенности конструирования стендовых устройств для испытаний высотных РДТТ в наземных условиях // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2009. – Вып. 1. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное». – С. 229–235.

6. Лях Ю.А., Королев В.Г., Бескровный И.Б. и др. Опыт предприятия по гашению внутреннего теплозащитного покрытия ракетных двигателей твердого топлива после окончания работы при проведении стендовых испытаний // Авиационно-космическая техника и технология: Науч.-техн. журн. – Харьков: ХАИ, 2012. – №9 (96). – 274 с.

Статья поступила 30.11.2015