

УДК. 621.454.2

Разработка экспериментально-расчетной системы исследования эффективности завесного охлаждения жидкостного ракетного двигателя малой тяги

Воробьев А. Г., Боровик И. Н., Хохлов А. Н., Богачева Д. Ю.

Статья посвящена вопросу разработки метода определения оптимального расхода на завесное охлаждение в жидкостных ракетных двигателях малых тяг. Приведены способы охлаждения стенок камеры и сопла ЖРД МТ, описан алгоритм разработки ЖРД МТ с использованием экспериментально-расчетной системы.

Ключевые слова: ЖРД малых тяг, эффективность завесного охлаждения, экспериментально-расчетная система.

Введение

Жидкостные ракетные двигатели малой тяги применяются в качестве исполнительных органов систем управления космических аппаратов и разгонных блоков, обеспечивая ориентацию и стабилизацию объекта в пространстве, коррекцию траектории в полете и т. д.

Применяемые в настоящее время жидкостные ракетные двигатели малой тяги (ЖРД МТ), работающие на самовоспламеняющихся топливных композициях, имеют достаточно высокую надежность и конструктивное совершенство. Так, для лучших образцов изделий коэффициент потерь удельного импульса составляет $\varphi_{\text{уд}} \approx 0,94$. Дальнейшее повышение удельного импульса тяги, являющегося основным показателем совершенства рабочего процесса ЖРД МТ, на современном этапе их развития оказывается практически

невозможным без использования принципиально топлив с более высокими энергетическими характеристиками.

Поэтому одним из направлений в развитии ракетной техники является разработка ЖРД МТ на несамовоспламеняющихся высокоэнергетических топливах, использующих в качестве окислителя газообразный кислород, высококонцентрированную перекись водорода (ВПВ), а в качестве горючего - различные углеводородные соединения в жидком или газообразном виде (керосин, спирт, метан и другие).

Проблемы охлаждения ЖРД МТ

Одной из актуальных задач остается обеспечение надежной тепловой защиты элементов конструкции и в целом ЖРД МТ, работающих в условиях высоких температур продуктов сгорания при минимально возможных потерях эффективности на цели охлаждения.

Сложность решения данной проблемы связана, прежде всего, с высокой температурой (до 3500...3700 К) и давлением (до 1,5 МПа) газов в камере сгорания. Расчеты показывают [1], что значения тепловых потоков в области минимального сечения сопла ЖРД МТ достигают величины 15...20 МВт/м², что приводит к значительному нагреву стенок камеры сгорания и сопла. Учитывая, что большинство конструкционных материалов сохраняют работоспособность при температуре до 1300... 1500 К, необходимость тепловой защиты стенок становится очевидной.

При применении высокоэнергетичных топлив проблема надежной тепловой защиты ЖРД МТ становится еще более актуальной.

Из известных в настоящее время способов отвода (поглощения) тепла (рис.1) на практике часто используются комбинации двух и более способов. Каждый из них или их сочетания могут быть реализованы в виде различных методов охлаждения в зависимости от выбранного конкретного конструктивного оформления.

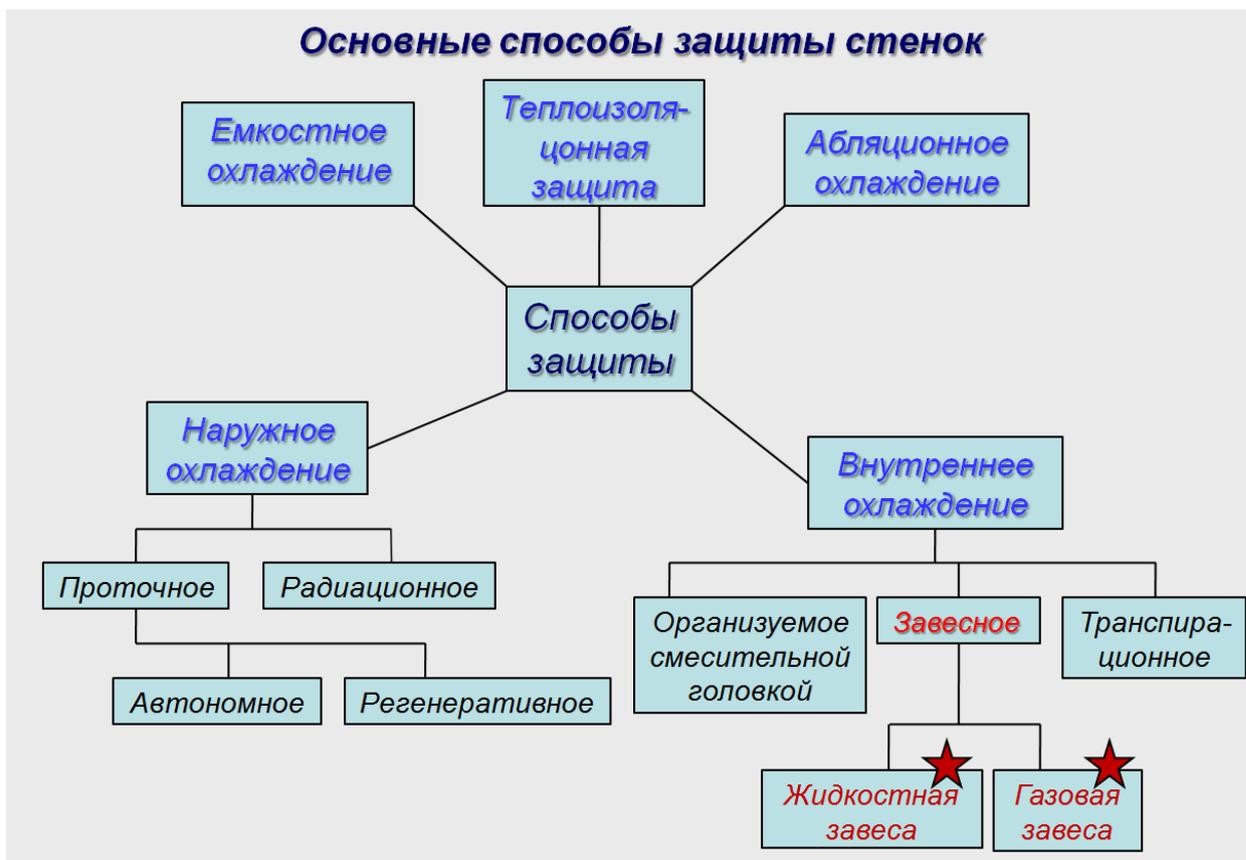


Рис.1. Классификация способов охлаждения стенок камеры и сопла ЖРД МТ. [2]

Использовать многие способы охлаждения (в том числе регенеративное, радиационное, емкостное, транспирационное, абляционное, теплоизоляционное охлаждение и другие), с успехом применяемые в ракетной технике, в условиях ЖРД МТ не всегда возможно. Основные причины этого связаны с относительно небольшими расходами топлива, ограниченными геометрическими размерами камер, малым числом форсунок, необходимостью работы как в непрерывном, так и в импульсном режимах.

Завесное охлаждение ЖРД МТ

Одним из перспективных путей решения задачи тепловой защиты стенок высокотемпературных ЖРД МТ на топливе является организация завесного (заградительного) охлаждения конструкции. Завесы создаются путем подачи компонента топлива через отверстия или щели в стенке, с таким расчетом, чтобы обеспечить пристеночный слой охлаждающего газа без нарушения оптимально организованного рабочего процесса в остальном объеме камеры.

Другим способом организации завесного охлаждения является внутреннее охлаждение, организуемое смесительной головкой [3].

При этом должны быть созданы условия, при которых потери удельного импульса тяги вследствие дополнительного расхода компонента на охлаждение будут минимально возможными.

Существующие схемы организации завес, несмотря на разнообразие применяемых технических устройств, как правило, реализуют один из следующих способов тепловой защиты:

- вдув охлаждающего газа в основной поток через пористый участок на начальной части поверхности КС;

- вдув охлаждающего газа через одну или несколько тангенциальных щелей, последовательно расположенных вдоль защищаемой поверхности.

В качестве объектов исследования выступают ЖРДМТ, разработанные на кафедре "Ракетные двигатели" МАИ с завесным охлаждением, организованным смесительной головкой. Первым двигателем является ЖРДМТ тягой 200Н, работающим на газообразном кислороде и керосине с электроискровой системой зажигания и газовой кислородной завесой. На рис.2 показан разрез смесительной головки данного двигателя. Конструкция данного экспериментального двигателя обеспечивает достаточно высокие энергетические показатели и сохранение работоспособности стенки при использовании завесного охлаждения, организуемого его смесительной головкой.

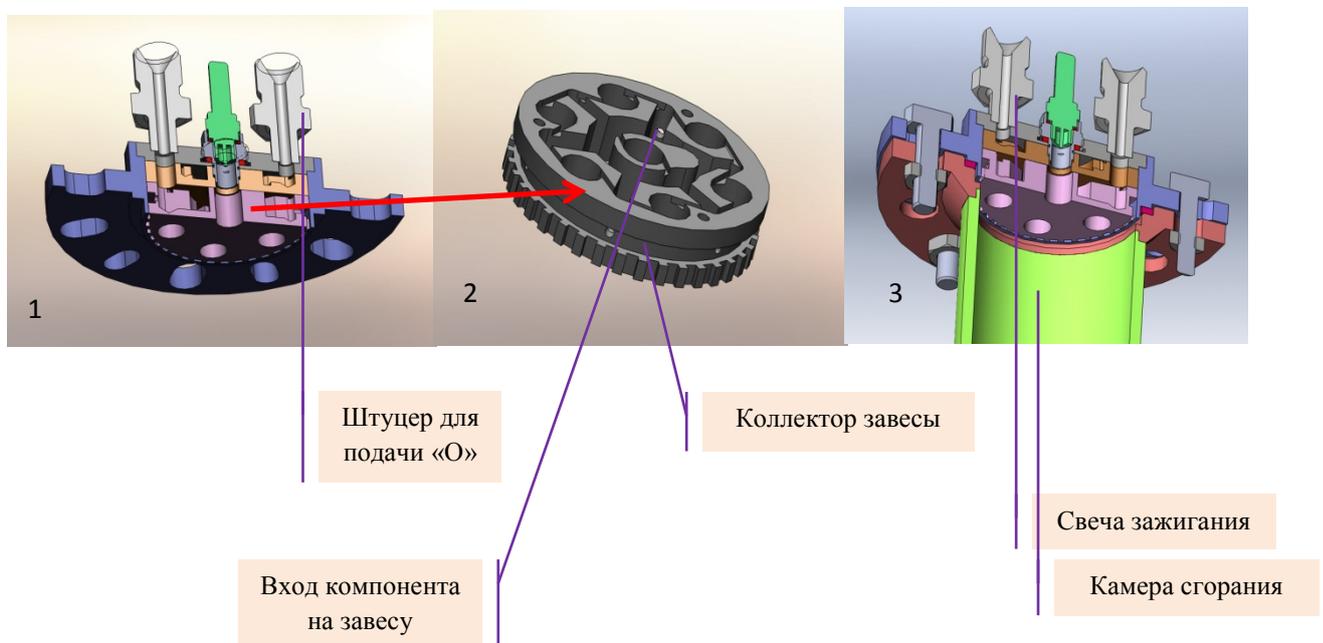


Рис.2. Конструкция 200 Н кислород (газообразный)+керосин (слева-направо):

1. головки в сборе (разрез),
2. пластины распределения завесы,

3. двигателя в сборе (разрез).

Другим объектом исследования является ЖРДМТ тягой 200Н, работающего на компонентах высококонцентрированная перекись водорода (96%) и керосин с жидкой завесой окислителем. На рис. 3 показан разрез головки экспериментального двигателя.

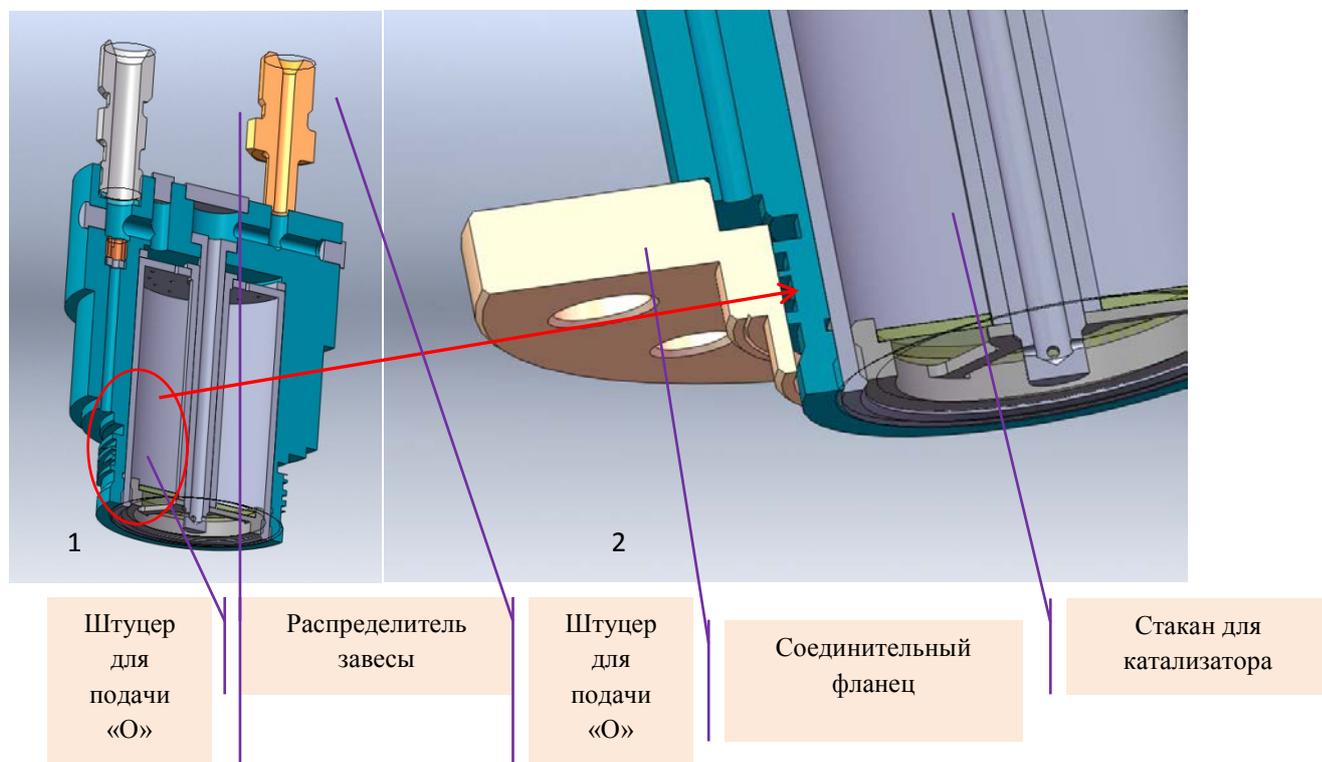


Рис.3. Конструкция 200 Н ВПВ+керосин:

1. головки без соединительного фланца (разрез)
2. часть головки с соединительным фланцем (разрез).

В ряде случаев на этапе проектирования не удается обеспечить требуемый уровень удельного импульса ЖРД МТ при заданном ограничении на температуру стенки. В этом случае приходится переносить решение проблемы на этап экспериментальной доводки, что однозначно ведет к существенному увеличению сроков и стоимости создания ЖРД МТ. Это связано с тем, что этап экспериментальной доводки ЖРД МТ, как известно, является весьма трудоемким. Причем, по мере роста теплонапряженности ЖРД МТ и необходимости надежной имитации высотных условий, его трудоемкость еще более возрастает, которая требует дополнительного препарирования ЖРД МТ датчиками теплового состояния, а также повышения сложности программы испытаний.

Выбор расхода на завесу является одной из основных задач при разработке ЖРД МТ, т. к. является отправной точкой для решения последующих задач:

1. выбор соотношения компонентов и получение максимального удельного импульса, при сохранении работоспособности стенки,
2. выбор материала камеры сгорания (КС),
3. выбор покрытия стенки КС,
4. ресурс ЖРД МТ.

Однако экспериментальная отработка ЖРД МТ и выбор расхода на завесу требует большого количества огневых испытаний, что увеличивает стоимость разработки.

Экспериментально-расчетная система

Для сокращения количества экспериментов при создании и доводке двигателя разработана экспериментально-расчетная система исследования эффективности завесного охлаждения ЖРД МТ. Общий алгоритм разработки ЖРД МТ выглядит следующим образом:

1. Создается математическая модель разрабатываемого двигателя по входным параметрам (вид топлива, расход топлива в КС, давление в КС, расход компонента топлива на завесу, соотношение компонентов топлива, тяга).
2. Проводится моделирование эксперимента и дается предварительная оценка режимных параметров экспериментального ЖРД МТ.
3. Создается экспериментальная конструкция разрабатываемого ЖРД МТ.
4. Проводятся гидравлические испытания созданной модели для получения расходных характеристик.
5. Проводятся огневые испытания по с целью определения адекватности математической модели.
6. В ходе испытаний на этапе доводки двигателя используется система выбора расхода на завесу в процессе эксперимента. Система анализирует тепловое состояние КС, рассчитывает оптимальный расход на завесу, и по каналу обратной связи с помощью электромагнитного регулятора изменяет расход компонента на завесное охлаждение. Ограничением выбора расхода на завесу является сохранение температуры стенки в пределах ее работоспособного состояния.
7. После обработки результатов испытаний принимается решение о соответствии заложенных параметров полученным результатам.

Общая схема отработки экспериментальных ЖРД МТ представлена на рисунке 4.

Благодаря использованию экспериментально-расчетной системы выбор расхода на завесу, соответствующего максимальному удельному импульсу и максимально возможной температуре стенки КС, происходит за существенно меньшее количество запусков по сравнению с общепринятым в отрасли планом экспериментов.

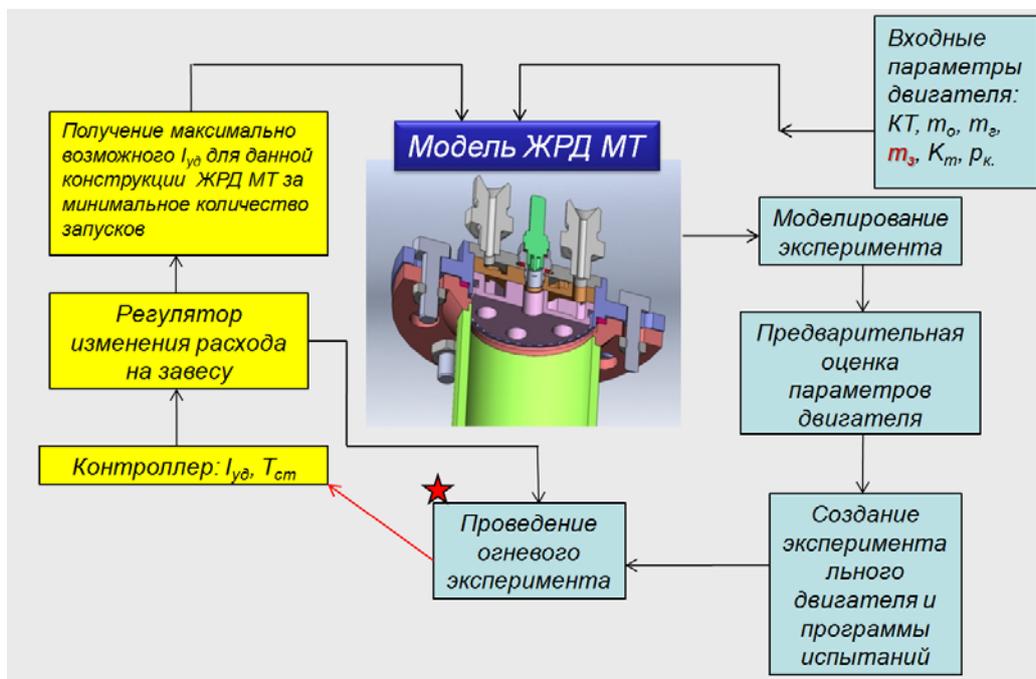


Рис.4 Схема отработки экспериментальных ЖРД МТ.

Экспериментально-расчетная система включает в себя:

- огневой стенд для испытаний экспериментальных ЖРД МТ [6, 7] ;
- математическую модель нестационарного теплового состояния камеры сгорания ЖРД МТ [4];
- автоматизированную систему управления и сбора информации;
- систему регулирования расхода на завесу.

В ходе огневого испытания ЖРД МТ, регулирование расхода на завесу осуществляется по 2-м входным параметрам:

1. предельно-допустимая температура стенки;
2. относительное изменение температуры:

$$\frac{\Delta T}{T} = \Delta \quad (1..3\%), \quad (1)$$

где $\Delta T = T_{i+1} - T_i$,

T_i - температура в определенный момент времени эксперимента,

T - средний ожидаемый температурный уровень стенки.

На графике (рис.5) приведена ожидаемая осциллограмма работы системы при достижении уровня $\Delta\epsilon$ (1..3%). Математическая модель в темпе эксперимента по данным о тепловом состоянии, давлении в КС и расходах компонентов топлива, вычисляет значение Δ и удельного импульса. В случае нахождения параметров в допустимых пределах контроллер подает команду на уменьшение расхода на завесу с помощью регулируемого электроклапана. Предусмотрен аварийный останов двигателя при достижении предельно-допустимой температуры стенки или высокого значения Δ .

График изменения рабочей температуры стенки в темпе эксперимента.

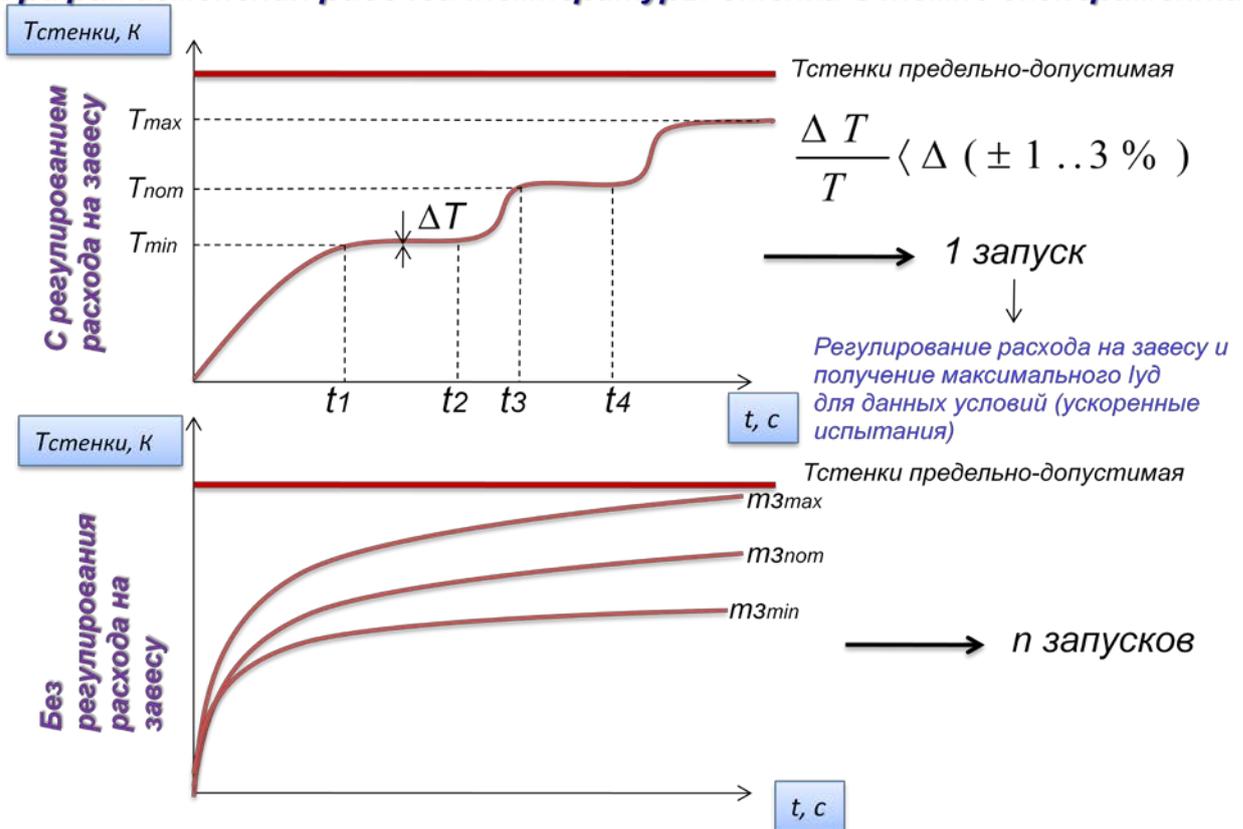


Рис.5. График изменения рабочей температуры стенки в ходе эксперимента

Тепловое состояние стенки камеры сгорания оценивается по показаниям 16 хромель-алюмелевых термопар, расположение которых приведено на рис. 6. Установка термопар по данной схеме основана на опыте предшествующих экспериментов.

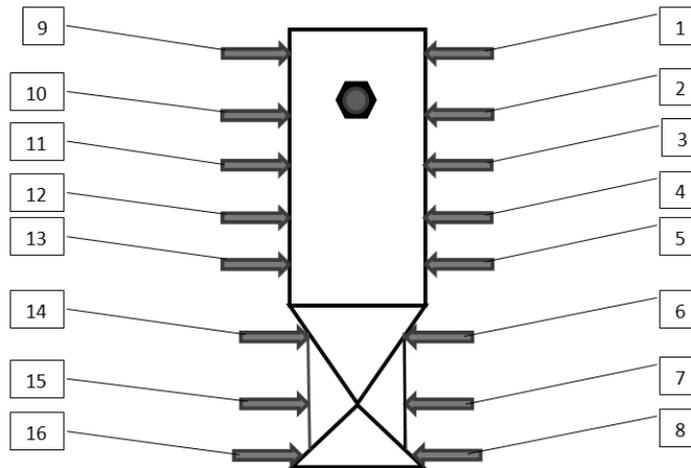


Рис.6 . Схема расположения термодатчиков.

Для регулирования расхода на завесу используется электроклапан пропорционального действия кориолисового расходомера-регулятора типа CORI-FLOW производства фирмы Bronkhorst [5, 6]. На рис. 7 показана принципиальная схема функционирования системы выбора оптимального расхода на завесу.

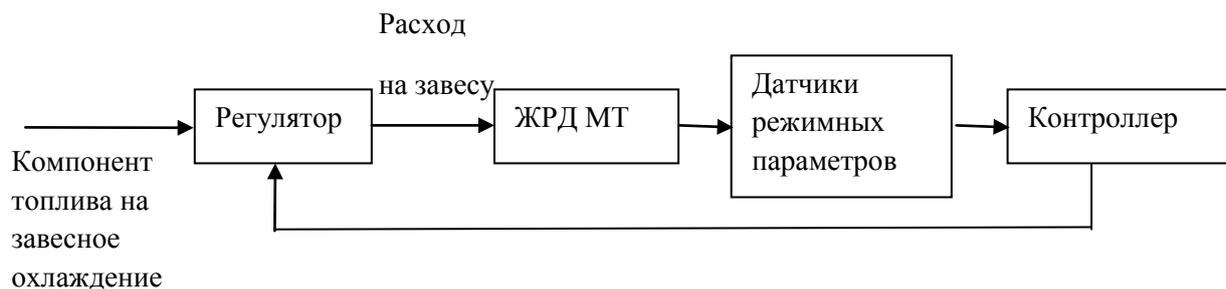


Рис.7 Схема работы системы выбора оптимального расхода на завесу.

Заключение

Разработанная экспериментально-расчетная система делает возможным оптимизацию плана экспериментов с уменьшением количества огневых испытаний и сокращением общего времени, затрачиваемого на разработку экспериментального ЖРД МТ .

В дальнейшем экспериментально-теоретическая модель будет подтверждена огневыми испытаниями.

Библиографический список

1. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / Под ред. Кудрявцева В. М. - М.: Высшая школа, 1975, 656 с.
2. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. - М.: Машиностроение, 1980, 533 с.
3. Агеенко Ю. И. Исследование параметров смесеобразования в жидкостных ракетных двигателях малой тяги со струйно-центробежной системой смешения компонентов топлива на стенке камеры сгорания. Космонавтика и ракетостроение, № 4 (57), 2009, Москва, ЦНИИМАШ, с. 170-176.
4. Воробьев А. Г. Математическая модель теплового состояния ЖРД МТ. Вестник МАИ, т. 4, № 4, 2007, Москва, МАИ, с. 42-49.
5. Воробьев А. Г., Боровик И. Н., Лизуневич М. М., Сокол С. А., Гуркин Н. К., Казеннов И.С. Модернизация испытательного огневого стенда для исследования рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях малых тяг на экологически чистых компонентах топлива. Вестник МАИ, т. 17, №1, 2010, Москва, МАИ, с. 97-100.
6. Корнеев А. К., Волокитин Д. А., Хохлов А. Н. Информационное обеспечение огневых испытаний на стенде жидкостных ракетных двигателей малых тяг. Сборник материалов Всероссийского научно-технической конференции, 2010, Москва, с. 15-17.

Сведения об авторах

Воробьев Алексей Геннадиевич, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., тел.: (499) 158-47-81, 8-916-572-07-25, e-mail: formula1_av@mail.ru.

Боровик Игорь Николаевич, старший преподаватель Московского авиационного института (национального исследовательского университета), тел.: (499) 158-47-81, 8-916-939-75-55, e-mail: borra2000@mail.ru

Хохлов Алексей Николаевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета), тел.: 8-905-539-09-75, e-mail: rat2004@hotmail.ru.

Богачева Дарья Юрьевна, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета), тел.: 8-906-041-74-26, e-mail: bogachulya@mail.ru.