

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШТАТНЫХ ЖРДМТ НА САМОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ ВКЛЮЧЕНИЙ

© 2011 С. А. Шустов

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

Излагаются результаты экспериментального исследования динамических характеристик штатных ЖРДМТ тягой от 10 до 130 Н на самовоспламеняющихся компонентах топлива при импульсных режимах включений: выявлены особенности формирования переднего и заднего фронтов импульсов, связанные с взрывным характером рабочих процессов с длительностью порядка 1 мс, проведен анализ влияния размерности ЖРДМТ на основные динамические параметры.

ЖРДМТ, задержка воспламенения, передний фронт импульса, задний фронт импульса, датчик давления, активный тягомер, командный сигнал, диаграмма импульсного режима.

Анализ состояния проблемы

Имеющиеся результаты исследования рабочих процессов жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ) на жидких самовоспламеняющихся компонентах топлива АТ+НДМГ на импульсных режимах включений связаны, во-первых, с проблемой обеспечения высокой экономичности, поскольку по мере уменьшения длительности командного сигнала удельный импульс ЖРДМТ на этих режимах быстро снижается по сравнению с непрерывным режимом. Кроме того, в последнее время все большую актуальность приобретает исследование импульсных режимов работы ЖРДМТ в связи с силовым, тепловым и загрязняющим воздействием струй этих ЖРДМТ на элементы конструкции, приборы и солнечные батареи космических аппаратов.

Проведенные исследования показывают, что всю совокупность протекания рабочих процессов по времени с момента подачи управляющего сигнала (напряжения на электромагнитных клапанах по линиям «О» и «Г») можно разделить на следующие стадии (рис. 1):

1. Открытие клапанов и заполнение заклапанных полостей.
2. Предпламенные процессы, характеризующиеся задержкой воспламенения.
3. Выход на установившийся режим (передний фронт импульса).
4. Работа на установившемся режиме.

5. Этап выключения двигателя (задний фронт импульса).

Проблема влияния заклапанных полостей на работу ЖРДМТ изучалась в работах А.Е. Жуковского, В.Е. Нигодюка, А.Р. Мироненко, В.Е. Окорочковой. В частности, рассматривались вопросы влияния нестационарности входных параметров на удельные и динамические характеристики ЖРДМТ. Было установлено, что колебания давления и расхода, возникающие в трубопроводах при включении и выключении двигателя, приводят к изменению формы импульса давления в камере сгорания. Колебания расхода при этом могут привести к неустойчивости соотношений компонентов топлива в импульсе.

Этап задержки воспламенения наиболее изучен, поскольку он оказывает весьма большое влияние на величину удельного импульса. Ему уделили большое внимание ряд как отечественных (Дубинкин Ю.М., Левин В.Я., Нигодюк В.Е. [1], Сиволодский Е.А), так и зарубежных авторов (Сименс Т. и Вэнпи М. [2], Петерсон Дж [3], Trinks Н. [4]). В этих работах рассматривалась как физика процессов самовоспламенения, в том числе в вакууме, так и влияние различных конструктивных и режимных факторов на период задержки самовоспламенения.

Процессы на третьей стадии изучены сравнительно мало, отечественных работ, посвященных непосредственно этой стадии, не обнаружено. В работах Левина В.Я. и Ни-

годюка В.Е. указывается на возможность резких забросов давления на переднем фронте, однако не приводится практически никаких сведений о физических процессах, вызывающих эти забросы. В работах Жуковского А.Е. и Окорочковой В.М. косвенно затрагивается эта проблема в связи с взаимодействием переходных процессов в камере сгорания и динамических процессов в системе топливоподачи и высказано предположение, что забросы давления на переднем фронте вызываются переходными процессами в подводящих трубопроводах.

Пятый этап довольно подробно рассмотрен в работе В.Г. Заботина, а также работе [5]. Установлена ведущая роль на этой стадии сначала выгорания топлива из клапанных полостей, а затем, после прекращения горения в связи с уменьшением температуры – испарения жидкой пленки с поверхности стенок камеры сгорания и сопла.

В целом результаты перечисленных работ показывают, что характер протекания рабочих процессов в ЖРДМТ при импульсных режимах включений определяется совокупностью большого числа факторов, основными из которых являются: объемы клапанных полостей по линиям «О» и «Г», схема смесеобразования, объем камеры сгорания, кинетические характеристики топлива, динамические характеристики управляющих электромагнитных клапанов двигателя, характер протекания динамических процессов в системе топливоподачи при включении и выключении ЖРДМТ. Однако отсутствуют какие-либо обобщающие результаты, позволяющие определить для конкретного двигателя параметры рабочего процесса на импульсных режимах включений. В частности, наиболее распространенной до настоящего времени остается термодинамическая модель импульса типа модели Петерсона [3]. В работе [6] делается попытка включения в модель импульса более детального учета основных рабочих процессов, однако в ней отсутствует учет кинетических процессов преобразования жидких компонентов топлива в газообразные продукты сгорания, а также учет механизма формирования жидкой пленки и жидких капель в процессе включения и выключения ЖРДМТ. Эти факторы учитываются в модели импульса ЖРДМТ,

реализованной в виде программного комплекса CONTAM III [7], однако каких-либо сведений о самой модели, позволяющих судить о степени ее общности и адекватности, в [7] не приводится.

В целом результаты анализа показывают, что имеющиеся в литературе результаты носят в основном качественный характер, являются недостаточно полными и надежными, не позволяют делать количественные оценки основных факторов, определяющих формирование загрязняющей фазы с учетом конструктивных и режимных характеристик конкретных штатных двигателей. При этом практически отсутствуют результаты исследования для штатных ЖРДМТ различной размерности. Поэтому основная цель данного исследования заключалась в выявлении рабочих процессов, определяющих динамические характеристики штатных ЖРДМТ тягой от 12 до 130 Н при импульсных режимах включений. Информация об этих процессах необходима для лучшего понимания физической природы этих рабочих процессов, формирования на этой основе их физико-математических моделей для решения актуальных проблем, связанных с совершенствованием энергетических и динамических характеристик существующих и разработкой перспективных ЖРДМТ, а также снижения загрязняющего воздействия струй штатных ЖРДМТ на элементы конструкции, оптические элементы датчиков и солнечные батареи космических аппаратов.

Методика и результаты экспериментального исследования

Экспериментальное исследование проводилось в научно-исследовательском центре космической энергетики (далее НИЦ КЭ) СГАУ (ранее ОНИЛ-2) с целью получения информации о рабочих процессах при импульсных режимах включений ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива АТин и НДМГ. Объектом исследования являлись штатные ЖРДМТ тягой 12 Н и 130 Н со струйной и струйно-центробежными системами смесеобразования. Номинальное входное давление в топливных магистралях составляло 1.5 МПа, коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок} = 0.6$. Характерные временные параметры ($\tau_{3.в.}$, τ_{01} , τ_{09}) определялись по

экспериментальным зависимостям давления $p_{\text{вх}}^0, p_{\text{вх}}^r$ в магистралях компонентов на входе в сопло $p_k(\tau)$, а также записей напряжения $U_{\text{кл}}(\tau)$ и токов $J_{\text{кл}}^0(\tau)$ и $J_{\text{кл}}^r(\tau)$ на управляющих клапанах в процессе включения и выключения ЖРДМТ (все перечисленные параметры показаны на рис. 1). При получении информации о динамике процессов в камере сгорания ЖРДМТ при импульсных режимах включения основная проблема заключалась в обеспечении высоких динамических характеристик используемых средств измерения, причем в целях обеспечения достоверности желательно одновременное использование не менее двух независимых каналов измерений. В качестве таких каналов в данном исследовании использовался канал измерения давления в камере сгорания и канал измерения тяги с помощью активного тягомера. Принцип измерения тяги активным тягомером основан на измерении силового воздействия струи на ловушку, помещаемую в эту струю. За счет снижения массы звена-преобразователя (в данном случае это жесткая мембрана, непосредственно воспринимающая силовое воздействие струи) достигается высокая собственная частота измерительного канала – порядка одного килогерца, существенно (примерно на порядок) превышающая собственную частоту канала измерения давления в камере сгорания.

Характерные результаты на примере

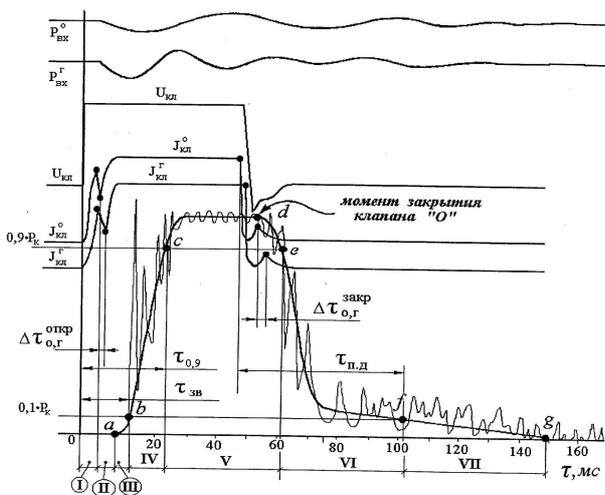


Рис. 1. Экспериментальная диаграмма для определения динамических параметров штатных ЖРДМТ (на примере ЖРДМТ тягой 12 Н со струйной схемой смесиобразования)

импульсного включения ЖРДМТ тягой 12 Н с длительностью командного сигнала $\tau_k = 0,05$ с показаны на рис. 1 и в основном сводятся к следующему:

- начало открытия клапанов происходит через 5 мс после подачи на них управляющего напряжения; сразу после начала открытия клапанов начинаются процессы движения компонентов по магистралям (это хорошо фиксируется по показаниям датчиков давления $p_{\text{вх}}^0, p_{\text{вх}}^r$, рис. 1) и заполнение заклапанных полостей; время полного открытия клапанов составляет 2 мс; таким образом, через 7 мс после подачи управляющего напряжения клапаны переходят в полностью открытое состояние;

- через 2 мс после полного открытия клапанов начинается повышение давления в камере сгорания; таким образом, динамические процессы, протекающие с момента начала открытия клапанов и включающие процессы открытия клапанов, заполнение заклапанных полостей и задержку воспламенения, занимают 4 мс; разновременность открытия и закрытия управляющих клапанов по линиям «О» и «Г» не обнаружена (в пределах точности экспериментального определения этих временных интервалов, равной 1 мс).

Далее излагаются результаты экспериментального исследования, относящиеся к переднему и заднему фронтам импульса (участки $a-c$ и $d-g$ на рис. 1), поскольку именно они определяют в основном процессы снижения удельного импульса и формирования загрязняющих компонент при включении и выключении ЖРДМТ. Детальное исследование, основанное на использовании активного тягомера, показало, что формирование переднего фронта импульса происходит в несколько стадий. Первая из этих стадий включает предпламенные процессы, которые длятся около 2 мс и приводят к линейному повышению давления в камере сгорания от начального, равного давлению в вакуумной камере, до уровня около $0,05 p_k$ (временной интервал $a-b$ на рис. 1).

Следующие стадии связаны с процессами преобразования в высокотемпературные продукты сгорания компонентов топлива, находившихся в камере сгорания к моменту их воспламенения. Эти процессы преобразования весьма динамичны, их харак-

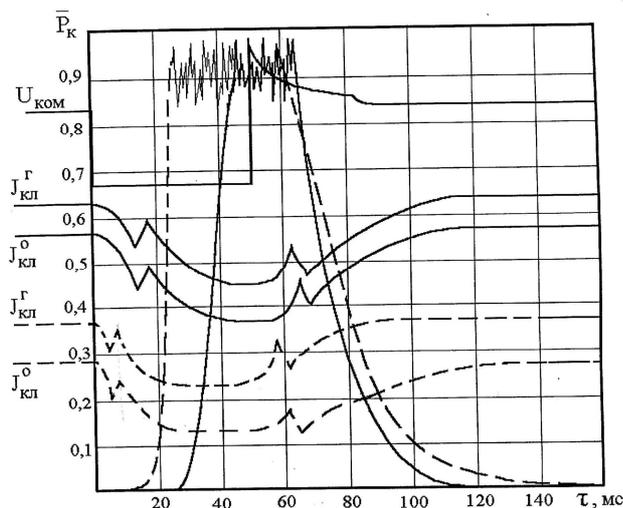


Рис. 2. Сравнение диаграмм импульсного режима включения штатных ЖРДМТ тягой 12 и 130 Н: длительность командного сигнала $\tau_{ком} = 0,05$ с; пунктирные линии – ЖРДМТ тягой 12 Н; сплошные линии – ЖРДМТ тягой 130 Н

терное время не превышает 1...2 мс. Они имеют взрывной характер, при этом давление в камере сгорания может превышать номинальное в несколько раз, в результате чего прекращается подача топлива из-за отсутствия перепада на форсунках, в связи с чем происходит истечение образовавшихся продуктов сгорания и быстрое снижение давления в камере сгорания, характерное время которого составляет 1...2 мс. В результате резкого снижения давления в камере сгорания возрастает расход компонентов, образующих следующую порцию, которая также взрывообразно превращается в продукты сгорания. Исследование показало, что передний фронт импульса формируется за счет 3-4 подобных стадий «взрыв» – «истечение» (временной интервал *b-c*, рис. 1).

Для интервала времени, соответствующего спаду давления в камере сгорания, можно выделить две стадии:

- первая стадия (участок *d-e* на рис. 1) связана с процессом горения компонентов топлива, поступающих из заклапанных полостей, а также части топлива, находящегося на стенке в виде жидкой пленки;

- вторая стадия (участок *e-g* на рис. 1) связана с процессом испарения жидкой пленки со стенки камеры сгорания и сопла.

Наличие жидкой пленки на стенках камеры сгорания и сопла вплоть до его среза является характерной особенностью работы

исследуемых ЖРДМТ в импульсных режимах работы. Видимая часть пленки вблизи среза сопла представляет собой жидкость с коричневатым оттенком с очень низким давлением насыщенных паров, не превышающим 0,15 мм рт. ст. Образованием пленки на стенке ЖРДМТ объясняется и различие в форме первого и последующих импульсов. Это различие проявляется в более интенсивных «забросах» давления на переднем фронте при втором и последующих за ним импульсах. По этой же причине на первом импульсе величина расходного комплекса в среднем по серии включений несколько меньше (на 3...5%), чем на втором и последующих импульсах.

Рассмотрим влияние размерности ЖРДМТ и схемы смесеобразования на динамические параметры на основе сравнения циклограмм ЖРДМТ тягой 12 и 130 Н при длительности командного сигнала $\tau_{ком} = 0,05$ с (рис. 2).

Результаты сравнения показывают, что схема смесеобразования оказывает наиболее существенное влияние на задержку воспламенения и формирование переднего фронта импульса. Это влияние проявляется в том, что переход от струйной системы смесеобразования (со смешением компонентов в основном на стенке камеры сгорания) к системе смесеобразования с центральной двухкомпонентной форсункой приводит к увеличению задержки воспламенения с 5 мс у ЖРДМТ тягой 12 Н до 10...12 мс у ЖРДМТ тягой 130 Н, а время формирования переднего импульса (время набора давления от 0,1 до 0,9) увеличивается примерно в два раза (с 13 до 28 мс).

В то же время схема смесеобразования оказывает слабое влияние на форму заднего фронта импульса, что указывает на идентичность процессов образования жидкой пленки на стенке камеры сгорания и сопла, а также ее испарения как в ЖРДМТ тягой 12 Н, так и в ЖРДМТ тягой 130 Н. Это согласуется и с визуальными наблюдениями процесса формирования жидкой пленки в сверхзвуковой части сопла при импульсных включениях ЖРДМТ тягой 12 и 130 Н, которые показывают их достаточно близкую идентичность. Здесь же отметим результаты, связанные с ролью разновременности закрытия клапанов

на форму заднего фронта импульса. Выше уже отмечалось, что для ЖРДМТ тягой 130 Н задана разновременность закрытия клапанов 40 мс. Для ЖРДМТ тягой 12 Н эта задержка составляет 10 мс, при этом так же, как и для ЖРДМТ тягой 130 Н, клапан «О» закрывается позже клапана «Г». Тем не менее, существенное различие в разновременности закрытия клапанов не привело к заметному отличию в форме заднего фронта импульса, что позволяет сделать вывод о слабом влиянии этого фактора на форму заднего фронта импульса.

Влияние размерности ЖРДМТ проявляется в увеличении суммарного объема заклапанных полостей с 36 мм³ у ЖРДМТ тягой 12 Н до 282 мм³ у ЖРДМТ тягой 130 Н. С этим же фактором, очевидно, связано увеличение времени $\tau_{кл}$ (время с момента подачи напряжения до полного открытия клапана) с 7 до 15 мс соответственно для ЖРДМТ тягой 12 Н и ЖРДМТ тягой 130 Н.

Существенно различаются у сравниваемых ЖРДМТ времена выгорания топлива при опорожнении заклапанных полостей (время с момента закрытия клапанов до момента снижения давления в камере сгорания ниже 0,9 p_k). Если у ЖРДМТ тягой 12 Н время выгорания составляет около 6 мс, то у ЖРДМТ тягой 130 Н – около 30 мс. Первоначально было высказано предположение, что это может быть связано с более эффективным процессом горения компонентов топлива при опорожнении заклапанных полостей ЖРДМТ тягой 130 Н, поскольку объемы его заклапанных полостей по линиям «О» и «Г» обеспечивают соотношение компонентов, близкое к стехиометрическому, в то время как у ЖРДМТ тягой 12 Н объемы заклапанных полостей при его выключении формируют соотношение компонентов, далекое от стехиометрического ($\alpha_{ок} \approx 0,2 \dots 0,3$). Однако более детальный анализ показал, что более вероятной причиной является различие в динамических характеристиках клапанов, которое проявляется в более быстром (на 22 мс) закрытии клапана «Г» после снятия напряжения у ЖРДМТ тягой 12 Н, чем у ЖРДМТ тягой 130 Н.

Таким образом, проведенное исследование позволило получить более детальную

физическую картину протекания рабочих процессов при импульсных режимах включения штатных ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива, а также выявить влияние на динамические характеристики схемы смесеобразования и размерности этих ЖРДМТ.

Библиографический список

1. Дубинкин, Ю.М. Проблемы организации рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей малой тяги [Текст] / Ю.М. Дубинкин, В.Е. Нигодюк // Изв. вузов. Авиационная техника. - 1993. - № 2. - С. 71-74.
2. Сименс, Т. Разработка фундаментальной модели самовоспламенения топлива в двигателях в условиях вакуума [Текст] / Т. Сименс, М. Вэнпи // Ракетная техника и космонавтика, 1967. - № 9. - С. 100-110.
3. Петерсон, Дж. Переходные процессы при запуске ракетных двигателей, работающих на самовоспламеняющемся двухкомпонентном топливе [Текст] / Дж. Петерсон // Исследование ракетных двигателей на жидком топливе. - М.: Мир, 1964. - С.427-438.
4. Trinks, H. Experimental Investigation on the Exhaust Plume Flow Fields of Various Small Bipropellant and Monopropellant Thrusters [Text] / H.Trinks, // AIAA Paper, - No 87-1603, 1987.
5. Дренинг, С. Определение импульса последствия и его разброс для небольших ракетных двигателей [Текст] / С. Дренинг. // Астронавтика и ракетодинамика.-1970. - № 41.
6. Годлевский, В.Е. Моделирование переходных процессов в РДМТ с учетом реальной скорости выгорания топлива [Текст] / В.Е. Годлевский // Динамические процессы в силовых и энергетических установках летательных аппаратов: межвуз. сб. науч. тр.: СГАУ. - Самара, 1994. - С.42-50.
7. Trinks, H. Experimental Investigation of Bipropellant Exhaust Plume Flowfield, Heating and Contamination, and Comparison with the CONTAM Computer Model Predictions [Text] / H.Trinks, R.E. Hoffman // AIAA Paper, No 83-1447, 1983. pp.1-12.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF STAFF LTRE WITH HYPERGOLIC PROPELLANT UNDER IMPULSE ENGAGING CONDITIONS

© 2011 S. A. Shustov

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

The results of the experimental research of dynamic characteristics of staff LTRE with thrust from 10 N to 130 N with hypergolic propellant under impulse engaging conditions are described. The formation specific of front and behind impulse connected with explosive character of working procedure during 1 ms is defined. The influence of the LTRE volume upon the basic dynamic parameters is analyzed.

LTRE, combustion's delay, front and behind impulse, pressure sensor, active blast meter, command signal, impulse condition diagram.

Информация об авторах

Шустов Станислав Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: shustov.st@yandex.ru. Область научных интересов: термогазодинамика двигателей летательных аппаратов.

Shustov Stanislav Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of aircraft engines department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: shustov.st@yandex.ru. Area of Research: thermo and gas dynamic of aircraft engines.