

УДК 541.1.011: 536.246

## ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ЖРДМТ СО СТРУЙНО-ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ ФОРСУНКАМИ НА САМОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА

© 2011 М. В. Силютин, С. А. Шустов

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

На основе экспериментального исследования предложена физическая модель рабочих процессов в камере сгорания ЖРДМТ со струйно-центробежной системой смесеобразования на самовоспламеняющихся компонентах топлива в шести взаимосвязанных областях.

*Жидкостный ракетный двигатель малой тяги (ЖРДМТ), модель рабочих процессов, методика проведения испытаний, неидеальное протекание рабочих процессов в камере сгорания.*

Актуальность рассматриваемой задачи обусловлена тем, что, с одной стороны, физические процессы в камере сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРДМТ), связанные с превращением жидких самовоспламеняющихся компонентов в высокотемпературное химически активное рабочее тело на входе в сопло, играют ключевую роль в обеспечении топливной экономичности и надежности ЖРДМТ, являющихся основным видом исполнительных органов системы управления пространственным положением космических аппаратов. С другой стороны, до настоящего времени отсутствует надежная физическая постановка задачи численного моделирования этих процессов вследствие их чрезвычайной сложности. Поэтому цель данной работы заключалась в физической постановке задачи численного моделирования рабочих процессов с учетом их неидеального протекания в камере сгорания.

### Постановка задачи

Общая физическая модель рабочих процессов в камере сгорания ЖРД приведена в [1]. Наиболее детальное исследование физической картины протекания термогазодинамических процессов в камере ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива проведено в совместном исследовании НИЦ КЭ СГАУ и НИЦ физической газовой динамики МАИ [3, 4]. Некоторые результаты этого исследования приведены на рис. 1, где показаны основные области физических процессов, протекающих в камере сгорания и сопле. Наиболее исследованными к настоящему времени являются области 1, 2 и 3 на рис. 1. Это области пограничного слоя на стенке камеры, конвективного и радиацион-

ного теплообмена между стенкой камеры и продуктами сгорания, а также область невязкого течения продуктов сгорания в сопле. Наименее изучены закономерности протекания физических процессов в области 5 на рис. 1, что проявляется в неопределенности положения их границ. В области 5 происходит жидкофазное взаимодействие компонентов и их превращение в газообразные продукты сгорания [2] и формирование поперечной эпюры соотношения компонентов и поля температуры. Достаточно полное представление о рабочих процессах в области 5 и связанной с ней областью 4 до настоящего времени отсутствует. Это ограничивает возможности изложенной в [3, 4] методики термогазодинамического расчета, учитывающей влияние неполного тепловыделения в камере сгорания на химический состав продуктов сгорания в рамках приближенного представления о протекании рабочих процессов в областях 4 и 5. В связи с этим основная цель данного исследования заключалась в выявлении более детальной картины рабочих процессов в областях 4, 5 и формирования на этой основе физической модели протекания этих процессов в камере ЖРДМТ от плоскости форсуночной головки до среза сопла.

Исследование проводилось для стационарных режимов включений длительностью около 1с для штатного ЖРДМТ тягой около 100 Н на самовоспламеняющихся компонентах топлива АТин и НДМГ со струйно-центробежной системой смесеобразования (центральная двухкомпонентная центробежная форсунка и шесть периферийных струйных форсунок окислителя).

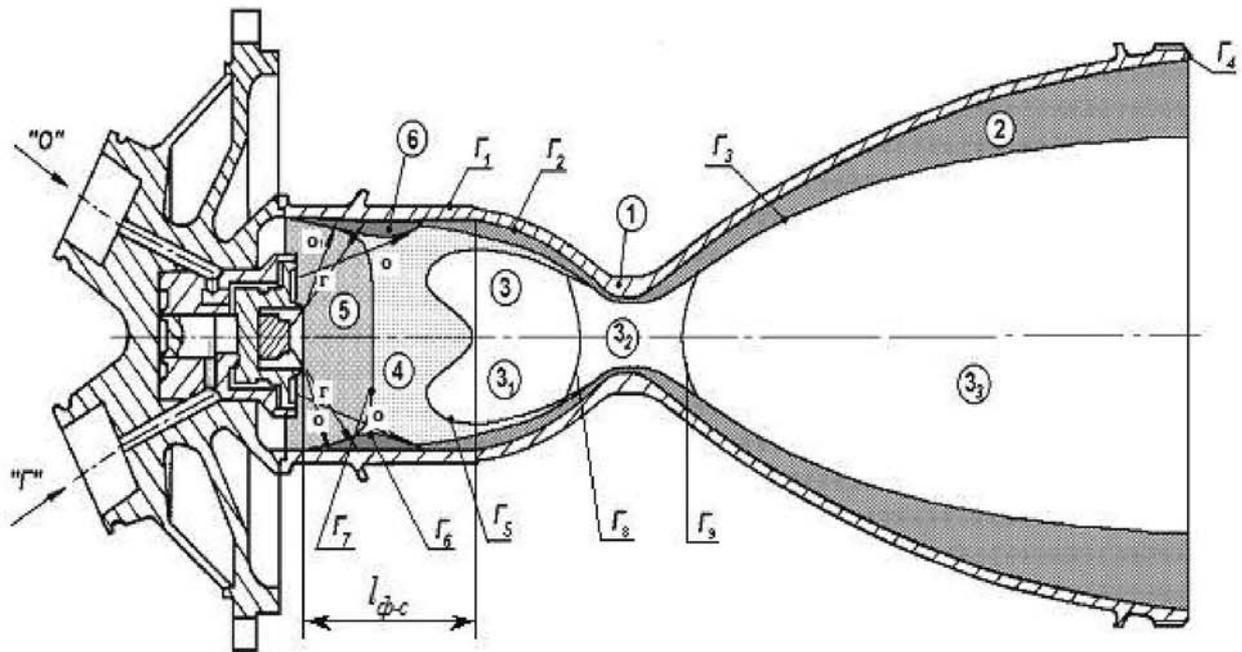


Рис. 1. Схематизация областей протекания термогазодинамических процессов в ЖРДМТ с учетом смесеобразования:

области физических процессов: 1 – область передачи тепла через стенку (механизм теплопроводности); 2 – область пристенка, пограничного слоя и передачи тепла от рабочего тела к стенке через механизм конвективного теплообмена; 3 – область невязкого течения высокотемпературного многокомпонентного рабочего тела; 3<sub>1</sub> – область равновесного течения; 3<sub>2</sub> – область кинетического течения; 3<sub>3</sub> – область замороженного течения; 4 – область тепловыделения в газовой фазе; 5 – область преобразования жидких компонентов в газовую фазу; 6 – область существования жидкой пленки на стенке;  $\Gamma_1$  – границы областей; о – подача окислителя, z – подача горючего

### Методика проведения исследования

За основу был выбран экспериментальный подход к проведению исследования. Основная проблема заключалась в отсутствии стандартных методов исследования рабочих процессов в камерах сгорания штатных ЖРДМТ вследствие их чрезвычайной сложности. В связи с этим была использована методика экспериментального исследования [5, 6]. При проведении эксперимента измерялись следующие параметры: напряжение и ток на управляющих клапанах по каждой из магистралей подачи компонентов, давление и температура на входе в двигатель для каждой из магистралей компонентов топлива, давление в камере сгорания, расход каждого из компонентов топлива за время включения двигателя. Кроме того, определялись профили температуры продуктов сгорания в различных сечениях от смесительной головки

до среза сопла, а также температура, фазовое состояние и химический состав пристенка.

Для проведения экспериментов использовалась модульная конструкция ЖРДМТ, преимуществом которой является возможность, с одной стороны, использовать штатную смесительную головку, а с другой – изменять приведенную длину камеры сгорания и применять различные вставки для экспериментального исследования внутрикамерных рабочих процессов. Конструктивная схема такой модульной камеры сгорания приведена на рис. 2. На этом же рисунке приведены значения характерных координат для гидравлических проливов центральной и периферийных форсунок. Экспериментальное исследование проводилось на стенде научно-исследовательского центра космической энергетики СГАУ, доработанном в соответствии с целью данной работы при непосредственном участии авторов.

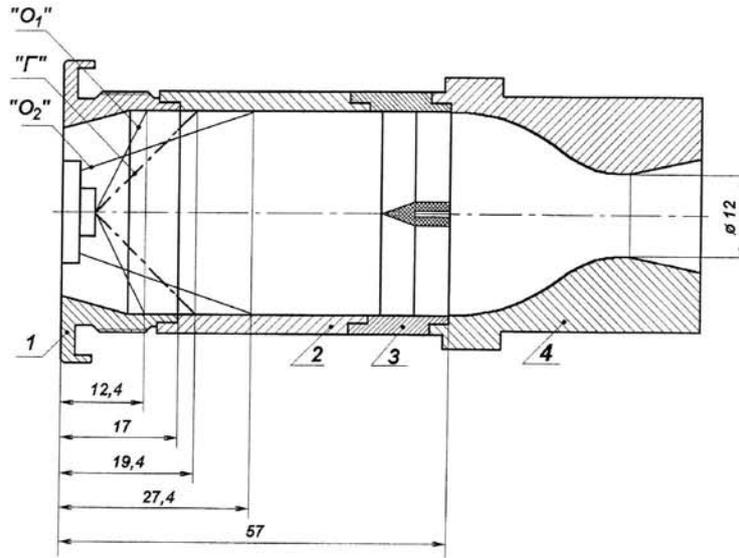


Рис. 2. Конструктивная схема модульной конструкции камеры сгорания и сопла с экспериментальной вставкой для определения профилей температуры: 1 – штатная смесительная головка камеры сгорания; 2 – сменная цилиндрическая вставка; 3 – экспериментальная вставка с пластиной; 4 – сопло

**Результаты исследования для штатного ЖРДМТ со струйно-центробежными смесительными элементами**

Результаты первого этапа, связанного с экспериментальным исследованием влияния приведенной длины  $l_{пр}$  на величину расходного комплекса  $\beta$  для штатного ЖРДМТ ЭД-6, приведены на рис. 3. Величина расходного комплекса определялась в соответствии с выражением  $\beta = \frac{p_{ос} \cdot F_*}{\dot{m}_\Sigma}$ , где  $p_{ос}$  - давление в камере сгорания,  $F_*$  - площадь минимального сечения сопла,  $\dot{m}_\Sigma$  - секундный суммарный расход топлива.  $\phi_\beta$  - коэффициент полноты расходного комплекса.

Для получения зависимостей на рис. 3 использовались результаты экспериментального определения расходного комплекса  $\beta$  для двух смесительных головок (№ 288 и 326) штатного ЖРДМТ ЭД-6 в составе модульной камеры сгорания с длиной цилиндрической части камеры сгорания в диапазоне от 0 до 80 мм. Этому диапазону длин цилиндрической части камеры сгорания соответствует диапазон значений приведенной длины камеры сгорания  $l_{пр}$  от 0,213м до 0,714м (для штатной камеры сгорания  $l_{пр} = 0,45$ м). Приведенная длина камеры сгорания  $l_{пр}$  определяется в соответствии с формулой

$$l_{пр} = \frac{V_{к.с}}{F_*}, \tag{1}$$

где  $V_{к.с}$  - объем камеры сгорания с дозвуковой частью сопла.

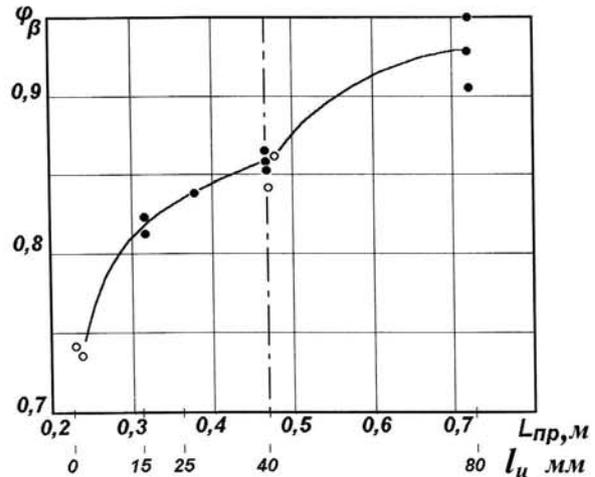


Рис. 3. Экспериментальные зависимости  $\phi_\beta(l_{пр})$  для штатного ЖРДМТ ЭД-6: ● – смесительная головка №326; ○ – смесительная головка №288

Выбор в качестве характерного параметра приведенной длины  $l_{пр}$  обусловлен его ясным физическим смыслом, поскольку величина  $l_{пр}$  пропорциональна, как известно, времени пребывания в камере сгорания.

Результаты определения величин  $l_{пр}$  в соответствии с (1) для различных вариантов длин цилиндрических вставок ЖРДМТ ЭД-6 сведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения  $l_{пр}$  для различных вариантов длин цилиндрических вставок ЖРДМТ ЭД-6

Номер варианта	1	2	3	4	5
Длина цилиндрической вставки $l_{ц}$ , мм	0	15	25	40	80
Приведенная длина $l_{пр}$ , м	0,213	0,307	0,369	0,463	0,714

Анализ экспериментальной зависимости на рис. 3 показывает, что уменьшение приведенной длины по сравнению со штатной камерой сгорания в 2,2 раза (с 0,463 м до 0,213 м) приводит к уменьшению коэффициента полноты расходного комплекса  $\varphi_{\beta}$  на 14 % (с  $\varphi_{\beta} = 0,86$  до  $\varphi_{\beta} = 0,74$ ). При этом минимальной приведенной длине  $l_{пр} = 0,213$  м соответствует расстояние от среза смесительной головки до входа в сопло лишь 17 мм, однако среднемассовая температура на этом расстоянии, определенная по величине расходного комплекса  $\beta$ , составляет около 1500 К. Это означает, что уже вблизи смесительной головки происходит преобразование основной части жидких компонентов в газообразные продукты сгорания, среднемассовая температура которых примерно в два раза меньше температуры при идеальном протекании рабочих процессов. Двукратное увеличение приведенной длины по сравнению со штатной камерой сгорания приводит к увеличению полноты расходного комплекса на 8,4 % и росту среднемассовой температуры примерно на 22 %, с 2200 К до 2700 К. При этом даже при двукратном увеличении приведенной длины камеры сгорания по сравнению со штатной среднемассовая температура остается примерно на 10 % ниже температуры при идеальном протекании рабочих процессов, равной 3006 К. Это свидетельствует о сравнительно медленном тепловыделении в газовой фазе по мере увеличения величины  $l_{пр}$ .

Типичные результаты экспериментального исследования процесса формирования поля температур в камере сгорания для ЖРДМТ ЭД-6 приведены на рис. 4.

Экспериментальные результаты, приведенные на рис. 4, показывают, что процесс формирования профиля температуры продуктов сгорания, характерного для штатной длины, завершается в диапазоне расстояний от среза форсунки от 13 до 18 мм.

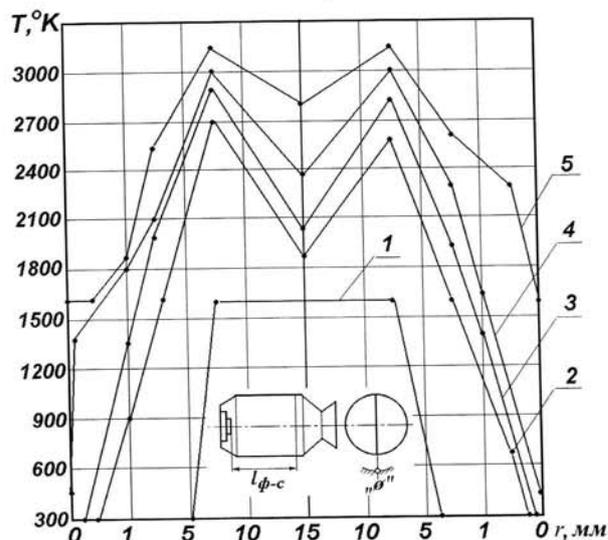


Рис. 4. Влияние  $l_{пр}$  на профили температуры для ЖРДМТ ЭД-6 со смесительной головкой №328:

- 1 –  $l_{ф-с} = 13$  мм; 2 –  $l_{ф-с} = 28$  мм; 3 –  $l_{ф-с} = 38$  мм;
- 4 –  $l_{ф-с} = 53$  мм (штатная длина камеры сгорания);
- 5 –  $l_{ф-с} = 93$  мм

Обратим внимание на профиль температуры, ближайший к плоскости смесительного элемента (зависимость 1 на рис. 4). Для этого профиля температуры характерны высокотемпературная зона в ядре и низкотемпературная зона в пристенной области; поперечный размер каждой из этих зон занимает примерно половину радиуса камеры сгорания. Разделены эти зоны расстоянием 2-3 мм, на котором «срабатывается» температурный перепад около 1300 К – от 1600 К в центральной высокотемпературной зоне до 300 К в холодной пристенной зоне. Начиная с расстояния от среза форсунки, равного 28 мм, все полученные профили температуры в области ядра вплоть до максимального расстояния, равного 93 мм, имеют характерную форму, которая отражает существенно немонотонный характер изменения температуры камеры сгорания в радиальном направлении, при этом холодная зона с температурой порядка 300 К исчезает, за исключением пристенка толщиной менее 1 мм. Характерная форма профилей температуры продуктов сгорания со 2 по 5 на рис. 4 отражает, с одной стороны, роль крупномасштабной не-

равномерности эпюры соотношения компонентов, которая сформировалась в области расстояний от 0 до 28 мм, а с другой - значительную роль процессов тепловыделения для камеры сгорания исследованного штатного ЖРДМТ.

Изложенные результаты позволили сформировать более детальную физическую модель рабочих процессов в камере сгорания с центробежно-струйной системой смесеобразования, представленной на рис. 5.

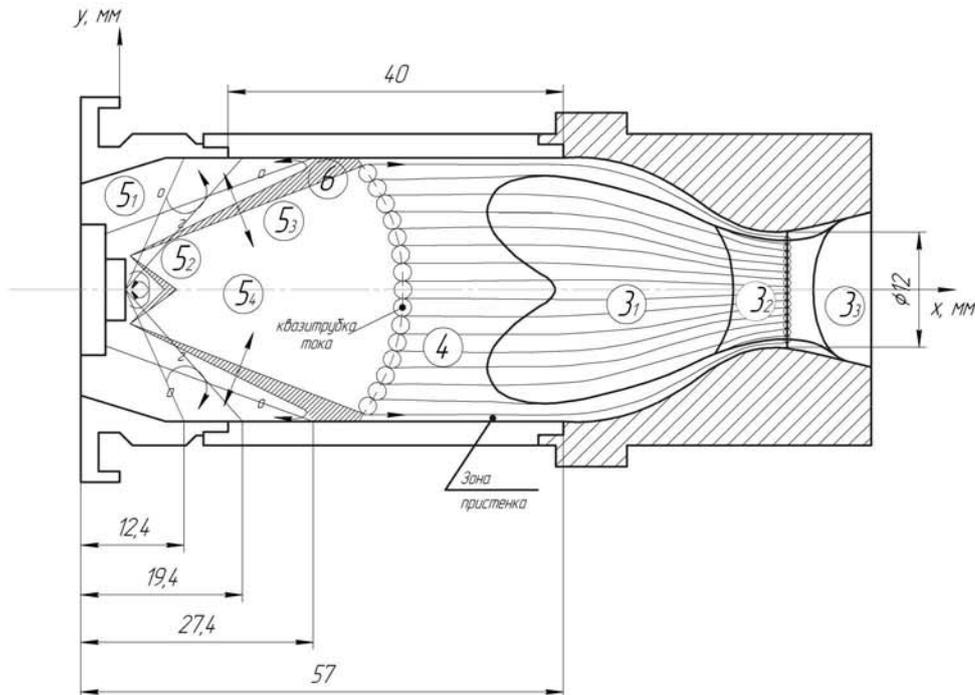


Рис. 5. Схематизация областей протекания рабочих процессов в зоне смесеобразования ЖРДМТ со струйно-центробежными форсунками:

3 - область невязкого течения высокотемпературного многокомпонентного рабочего тела; 3<sub>1</sub> - область равновесного течения; 3<sub>2</sub> - область кинетического течения; 3<sub>3</sub> - область замороженного течения; 4 - область тепловыделения в газовой фазе; 5<sub>1</sub>, 5<sub>2</sub> - зоны обратных токов; 5<sub>3</sub> - область жидкофазного взаимодействия; 5<sub>4</sub> - зона формирования эпюры соотношения компонентов

В соответствии с рис. 5 в области 5 камеры сгорания выявлен ряд зон, для каждой из которых характерна своя группа основных физических процессов.

Зона 5<sub>3</sub> - это зона жидкофазного взаимодействия, в которой происходят процессы преобразования жидких компонентов в низкотемпературные газообразные продукты промежуточных реакций (в терминологией [2] - парогаз). Эта зона для рассматриваемой схемы смесеобразования имеет форму усеченного конуса, направленного от смесительной головки к стенке камеры сгорания. Расстояние в осевом направлении от плоскости смесительной головки до пересечения этого конуса со стенкой камеры составляет около 30 мм, а характерная толщина конуса жидкофазного взаимодействия составляет 1,5...2 мм. Для этой зоны характерны такие ключевые физические процес-

сы, как жидкофазное взаимодействие пленок компонентов друг с другом и гидродинамическое взаимодействие конуса жидкофазного взаимодействия со стенкой камеры сгорания. Отметим также зону 6 - это область взаимодействия конуса 5<sub>3</sub> со стенкой. В области 6 происходит взаимодействие компонентов из центральной и периферийных форсунок со стенкой, в результате чего образуются газообразные промежуточные продукты сгорания, жидкая пленка и газообразный пристенок. Отметим, что физические процессы, связанные с формированием пристенка, являются не менее сложными, чем в ядре потока и в области форсуночной головки, а степень их понимания пока ещё далека от желаемой.

Конусообразная зона жидкофазного взаимодействия 5<sub>3</sub> разделяет область рабочих процессов в камере сгорания вблизи

плоскости форсуночной головки на две зоны. Первая из них обозначена на рис. 5 как область  $5_1$ , которую условно назовем внешней по отношению к зоне жидкофазного взаимодействия  $5_3$ . Эта область примыкает к торцевой поверхности камеры сгорания; для этой зоны характерно наличие обратных токов, весьма низкая температура, соответствующая температуре парагаза и не превышающая 400 К, а также высокий молекулярный вес парагаза. Вторая область обозначена на рис. 5 как область  $5_4$ , которую условно назовем внутренней по отношению к зоне жидкофазного взаимодействия  $5_3$ . Область  $5_4$  занимает зону внутри конуса жидкофазного взаимодействия, характерный размер этой зоны в осевом направлении составляет около 30 мм. Для области  $5_4$  характерно в основном осевое течение в сторону среза сопла со значительными поперечными скоростями и значительными градиентами температуры как в осевом, так и поперечном направлении вследствие интенсивного тепловыделения в газовой фазе; отметим, что именно в этой области формируется эпюра соотношения компонентов, которая затем сохраняется вплоть до среза сопла. Для этой области характерно существенное повышение средне-массовой температуры в диапазоне от 400 К до 1600 К по мере увеличения осевого расстояния от плоскости смесительной головки.

Область  $5_3$  переходит в зону, которая на рис. 5 обозначена как зона 4. Эта зона в осевом направлении ограничена входом в сопло и для этой зоны характерным является практически одномерный характер течения в осевом направлении. При этом поперечные перемещения в зоне 4 осуществляются только за счет механизма турбулентности, что позволяет использовать в этой зоне модель стратифицированного течения в виде совокупности кольцевых квазитрубок тока, схематично показанных на рис. 5. В области 4 ключевую роль играют процессы турбулентной диффузии, в результате которых происходит смешение компонентов газовой фазы до молекулярного уровня с последующим протеканием химических реакций между молекулами окислителя и горючего и выделением тепла. Для зоны 4 характерным является как диффузионный, так и кинетический механизм тепловыделения, именно для этой

зоны получена основная часть профилей температуры исследованных ЖРДМТ. В результате тепловыделения средне-массовая температура в зоне 4 увеличивается от 1600 К до 2200...2700 К (в зависимости от приведенной длины камеры сгорания). Основным источником тепловыделения в зоне 4 являются, также как и в зоне  $5_3$ , экзотермические химические реакции с преимущественным протеканием реакций диссоциации и, соответственно, уменьшением молекулярного веса продуктов сгорания.

Зона 4 граничит с зоной, далее называемой зоной пристенка. Эта зона на рис. 1 обозначена как зона 2. В результате специально проведенного исследования было установлено, что поперечный размер зоны пристенка по длине камеры сгорания изменяется от величины порядка 1 мм в начале этой зоны (соответствует области взаимодействия конуса жидкофазного взаимодействия со стенкой камеры сгорания) до величины порядка 0,01 мм на входе в сопло. Внутри зоны пристенка находится зона пограничного слоя; характерной особенностью пограничного слоя является граница в виде стенки камеры сгорания, где скорость пограничного слоя является нулевой. Физические процессы в пристеночной области и ядре потока тесно взаимосвязаны. В результате этого взаимодействия уже вблизи форсуночных головок в области  $5_4$  формируется поперечная эпюра соотношения компонентов, которая затем сохраняется вплоть до среза сопла в виде совокупности кольцевых квазитрубок тока, в каждой из которых сохраняется определенное соотношение компонентов, сформированное в зоне  $5_4$ .

Таким образом, применительно к штатному ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива со струйно-центробежной системой смесеобразования впервые предложена физическая модель рабочих процессов для всей области камеры от плоскости смесительной головки камеры сгорания до среза сопла. Эта модель, с одной стороны, отражает чрезвычайно сложную физическую картину рабочих процессов, протекающих в камере сгорания и сопле ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах. Прямое численное моделирование этих процессов с приемлемым уровнем адек-

ватности пока не представляется возможным вследствие отсутствия ряда детальных представлений о физических механизмах протекающих процессов (гидродинамике и кинетике жидкофазного смешения, механизме турбулентности газовой фазы в невязком ядре, пристенке и пограничном слое, гидродинамике и кинетике формирования пристенка как в жидкой, так и газообразной фазе), о химическом составе и химической кинетике продуктов неполного сгорания в газовой фазе и т.д. Тем не менее предложенная физическая модель позволяет сформулировать ряд следующих физически оправданных допущений, позволяющих учесть влияние неидеального протекания рабочих процессов на термогазодинамический процесс течения продуктов сгорания от входа в сопло до среза сопла:

1) в ЖРДМТ течение продуктов сгорания имеет стратифицированный (слоистый) характер, который сохраняется до среза сопла; поток рабочего тела в сопле можно представить в виде кольцевых квазитрубок тока, каждой из которых соответствует определенное соотношение компонентов;

2) температура торможения на входе в сопло в каждой из квазитрубок тока меньше идеальной для соответствующего этой квазитрубке тока соотношения компонентов из-за неполного тепловыделения; в первом приближении снижение температуры торможения можно определить по величине коэффициента полноты расходного комплекса  $\varphi_{\beta}$ , который либо определяется экспериментально, либо задается;

3) процесс протекания химических реакций в каждой из квазитрубок тока на входе в сопло считается равновесным.

Эти допущения завершают физическую постановку задачи о термогазодинамическом расчете ЖРДМТ с учетом неидеального протекания рабочих процессов в камере сгорания. Это позволяет перейти к математической формулировке задачи и ее численному

решению, тем самым существенно расширив возможности термогазодинамического расчета ЖРДМТ применительно к сокращению сроков и затрат, связанных с модернизацией существующих и созданию перспективных ЖРДМТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки), на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

### Библиографический список

1. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст]: учебник для ВУЗов / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.Л. Тишин – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.
2. 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.
3. Моделирование газодинамических и теплообменных процессов в ЖРДМТ [Текст] / Н.В. Безменова, И.Э. Иванов, С.А. Шустов [и др.] // Математическое моделирование. РАН. 2001. Т. 13. - № 6. – С.45-51.
4. Шустов, С.А. Численное моделирование термогазодинамических процессов в ЖРДМТ с учетом их неидеального протекания [Текст] / С.А. Шустов // Вестн. МАИ.- 2009.- Т. 16, - №2.- С.146-153.
5. Метод определения профилей состава и температуры высокотемпературных газовых потоков [Текст] / В.Н. Градов, В.Е. Нигодюк., С.А. Шустов [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 1980. - № 5.
6. Шустов, С.А. Экспериментальное исследование процессов формирования поперечных профилей термогазодинамических параметров продуктов сгорания на входе в сопло штатных ЖРДМТ [Текст] / С.А. Шустов // Вестн. МАИ.- 2009. - Т.16. - №2. - С.85-92.

## **PHYSICAL WORKFLOW MODEL IN THE COMBUSTION CHAMBER LREST WITH A JET-CENTRIFUGAL JETS ON HYPERGOLIC PROPELLANTS**

© 2011 M. V. Silyutin, S. A. Shustov

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

Based on the experimental study a suggested physical model working processes in the combustion chamber LREST with jet-centrifugal jets on the hypergolic propellants into six interrelated areas.

*Liquid rocket engine of small thrust (LREST), model workflows, test methodology, not the ideal course of workflows in the combustion chamber.*

### **Информация об авторах**

**Силютин Максим Владимирович**, ассистент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, инженер научно-исследовательского центра космической энергетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: термогазодинамические процессы в жидкостных ракетных двигателях.

**Шустов Станислав Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: термогазодинамические процессы в жидкостных ракетных двигателях.

**Silyutin Maxim Vladimirovich**, assistant of department theory of aircraft engine, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: thermogasodynamic process in liquid rocket engine.

**Shustov Stanislav Alekseevich**, Candidate of technical Sciences, associate Professor of theory of aircraft engine department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: thermogasodynamic process in liquid rocket engine.