

U↓). Что позволяет рационально, исходя из требования получения высокой экономичности, выработать параметры системы смесеобразования.

### Список литературы

1. Дубинкин Ю.М., Нигодюк В.Е. Модель взаимодействия гипергольных топлив. Труды X Российской НТК «Теплофизика технологических процессов» – Рыбинск, 1996.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЖРДМТ

Дубинкин Ю.М., Нигодюк В.Е.

Самарский Государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Реактивные системы управления (РСУ) нашли широкое применение в КЛА народно-хозяйственного, оборонного и научного назначения. Наиболее широкое применение в настоящее время получили системы, использующие самовоспламеняющиеся жидкие ракетные топлива.

В силу специфики задач, решаемых с помощью РСУ, ЖРДМТ работают на борту КЛА в непрерывных и импульсных режимах в очень широком диапазоне продолжительности и частоты управляющих сигналов ( $\tau_c$ ,  $f$ ). При этом реальная форма импульса тяги существенно отличается от идеализированной (прямоугольной), вследствие инерционности физико-химических процессов, протекающих в ЖРДМТ и в двигательной установке (ДУ).

Потенциально ЖРДМТ может позволить получить высокие энергетические ( $J_{y,п} = 3000...3300 \text{ М/с}$ ) и динамические (задержка воспламенения -  $\tau_b \approx 1 \text{ мс}$ ) параметры.

Однако практическая реализация высоких возможностей РСУ столкнулась с принципиальными трудностями, связанными с условиями работы (вакуум), режимами (непрерывный и импульсный), особенностями конструкции (малое число форсунок и расхода топлива, отсутствие регенеративного охлаждения и т.д.), не стационарностью и неравновесностью процессов.

Анализ эффективности РСУ (1) с учётом реальных особенностей импульса тяги (запаздывание, последствие), дисбаланс тяг, ухудшение

характеристик при уменьшении времени работы показал, что средний реальный расход топлива может увеличиваться по сравнению с идеальным (прямоугольный импульс без запаздывания и дисбаланса) от 10 % до 10 раз. Это обусловлено, прежде всего, несовершенством организации подачи топлива в ЖРДМТ и внутрикамерных процессов (воспламенение, горение, теплозащита, процессы в сопле).

Анализ характеристик существующих зарубежных и отечественных ЖРДМТ показал, что их экономичность даже на стационарных режимах работы существенно отличается от теоретических характеристик ЖРДМТ из-за несовершенства организации процессов горения и теплозащиты в камере сгорания (К.С.) -  $\varphi_p = 0.7...0.85$  и больших потерь в сопле  $\varphi_c = 0.90...0.95$ .

Особенно сильное ухудшение экономичности имеет место при импульсном режиме работы при уменьшении  $\tau_c$ , что обусловлено большими значениями  $\tau_v$  (7...10 мс) и влиянием динамики систем подачи топлива.

Исследование процессов воспламенения и горения типичных СЖРТ показал, что одним из основных факторов, определяющих эффективность этих процессов является жидкостное взаимодействие компонентов.

При разработке теории взаимодействия СЖРД с учётом влияния реакций тепло и массообмена, гидродинамических процессов и фазовых превращений в нестационарных условиях используем положения, которые могут быть сформулированы на основе экспериментальных исследований.

В результате контактирования струй О и Г образуется центральное тело жидкофазных продуктов взаимодействия (ЖФПВ) с очень низким давлением насыщенных паров, окружённое плёнками О и Г.

ЖФПВ имеют высокую температуру за счёт выделения химической энергии.

Тело ЖФПВ растёт за время образования – период взаимодействия  $\tau_{\text{жв}}^I \approx 0.1$  мс.

Гидродинамическое взаимодействие струй О и Г приводит к формированию струй (пелены) дуплетной структуры, которая вследствие перемешивания и химических реакций переходит в струю триплетной структуры (О-ЖФПВ-Г). Рассмотрение физико-химических, гидродина-

мических и струйных аспектов этого процесса позволило определить основные параметры динамики и геометрии триплетной струи (пелёны).

Анализ теплового состояния последней на основе уравнений нестационарной теплопроводности показал, что зоны прогрева пелён О и Г составляют небольшую величину (5... 10 мк при  $\tau \sim 1$  мс). Высокие значения температур в зоне контактов (О-ЖФПВ-Г) приводят к образованию и росту пузырей О и Г.

На основе анализа указанных процессов был выявлен физико-химический механизм распада взаимодействующих струй СЖРТ и характерные типы генерируемых при этом возмущений: микроскопические, слабые, промежуточные и сильные, обусловленные, соответственно, прорывом пузырей О и Г своих пелён и выходом их в КС, прорывом ими пелён с последующим смещением и взрывом, вскипанием при этом перегретых слоёв пелён О и Г, детонацией тела ЖФПВ.

Особо важным аспектом взаимодействия СЖРТ является процесс смешения и формирования тела ЖФПВ. В общем случае время смешения может ограничиваться не только химическими процессами, но и гидродинамической устойчивостью пелён. Поэтому была разработана общая теория гидродинамической устойчивости пелён и выявлены два основных механизма распада – поверхностный и сдвиговый, получены уравнения распада и определены времена распада и границы устойчивости по абсолютным и относительным скоростям движения пелён в зависимости от физических свойств жидкости, условий окружающей среды и параметров системы подачи топлива.

Комплекс экспериментальных исследований процессов взаимодействия СЖРТ был проведён в условиях вакуума с использованием компонентов СЖРТ (О и Г).

Сравнение расчётных и экспериментальных характеристик по гидродинамической устойчивости позволяет сделать вывод об их хорошей сходимости и сильной зависимости частот возмущений от конструкций и режимов работы смесителя, температуры компонентов, их физических свойств и давления в КС.

Таким образом разработанная теория взаимодействия СЖРТ позволяет получить основные граничные условия для рассмотрения внутрикамерных процессов ЖРДМТ.

Так как основным режимом работы ЖРДМТ является импульсный, то подача топлива в КС практически всегда происходит на фоне переходных процессов в топливных магистралях ДУ и гидравлическом

тракте двигателя, что оказывает существенное влияние на формирование импульса тяги, процессы взаимодействия СЖРТ и преобразования топлива в КС. На основе гидродинамики системы подачи было получено обобщённое уравнение для расхода топлива ( $O$  и  $\Gamma$ ) с учётом перестройки течения жидкости, её свойств, параметров системы подачи, колебательных и диссипативных процессов. Кроме того исследование процессов течения жидкости в сложных каналах форсуночных головок ЖРДМТ показало, что оно имеет свои принципиальные возможности.

Теоретически было предсказано и экспериментально подтверждено наличие резонанса колебаний жидкости в головке с колебаниями в трубопроводах подачи.

Особо сильное влияние на организацию процессов жидкофазного контакта СЖРТ оказывает низкое давление в КС при запуске ЖРДМТ. На основе рассмотрения физических процессов в жидкости при впрыске в вакуум была разработана теория распада струй при низких  $\beta_k$  и получены уравнения распада. Сравнение экспериментальных и расчётных  $\tau_p$  (времени распада) для разных жидкостей показало их хорошую сходимость и подтвердило определяющее влияние неравновесного роста пузырей пара на этот процесс.

Основным процессом, определяющим динамические характеристики и экономичность работы ЖРДМТ в импульсном режиме является процесс воспламенения СЖРТ.

На основе полученных моделей процессов подачи и взаимодействия СЖРТ была разработана теория нестационарного воспламенения СЖРТ с учётом условий впрыска компонентов, образования и разложения ЖФПВ, генерации парогаса, его свойств, формирование очага воспламенения, химических превращений, подготовительных процессов и т.д. и получено общее уравнение воспламенения, которое позволило провести анализ влияния конструктивных и режимных параметров смесителя и КС, свойств топлива и его температуры на период воспламенения  $\tau_b$ .

Анализ влияния конструкции смесителей, состава топлива и других факторов на  $\tau_b$  показал, что определяющим фактором является температура парогаса. Это позволило разработать модель воспламенения, которая показала возможность запуска ЖРДМТ с минимальными  $\tau_{\text{вmin}} \approx 1$  мс (в вакууме).

На основе полученных результатов были сформулированы основные требования к системе смесеобразования и разработан способ организации воспламенения СЖРТ, обеспечивающий получение  $\tau_{\text{вmin}} \approx 1$  мс и высокой экономичности ЖРДМТ в импульсном режиме работы.

Экономичность работы ЖРДМТ в непрерывном режиме работы определяется эффективностью процессов горения СЖРТ и теплозащиты стенок камеры. В тоже время чрезвычайно сложный механизм взаимодействия струй СЖРТ и отсутствие теории этого процесса делало невозможным построение модели горения СЖРТ.

В общем случае преобразования топлива в ЖРДМТ можно представить как горение трёхкомпонентной смеси (О-Г-ЖФПВ-жидкость и пары), генерируемые смесителем. Детальное рассмотрение процессов на основе уравнений распыла, энергии, движения, химического превращения, турбулентного обмена, фазовых превращений с учётом тепло и массообмена представляет собой чрезвычайно сложную нелинейную задачу, которая не решается в общем случае даже для более простого варианта двухкомпонентной смеси. Однако анализ характерных условий и скоростей процессов показал, что лимитирующими стадиями являются турбулентная диффузия и испарение Г и О. На основе этого была разработана модель горения с учётом этих факторов и получены уравнения для экономичности ЖРДМТ, позволяющие учитывать влияние конструктивных и режимных факторов и условий работы смесителя на  $\varphi_{\beta} = f(\beta_k, \alpha, L_{\text{пр}}, \text{условий смешения})$ .

Анализ полученных соотношений показал определяющее влияние количества ЖФПВ, генерируемого смесителем, на  $\varphi_{\beta}$ . Последнее определяется параметрами струйной подачи и процессами гидродинамической устойчивости струй и пелён СЖРТ. Оптимизация условий взаимодействия позволяет получить высокие  $\varphi_{\beta}$ , если процесс идёт в устойчивой области. Именно гидродинамическая неустойчивость приводит к аномальному характеру  $\varphi_{\beta}(G)$  – снижению  $\varphi_{\beta}$  с ростом  $\beta_k$  (т) при  $\alpha = \text{const}$  (обычно наоборот). Таким образом, разработанная модель горения показала определяющее влияние условий жидкофазного взаимодействия и гидродинамической устойчивости этого процесса, которые обычно и нарушаются в традиционных схемах смесеобразования, и возможность получения высокой экономичности при малых  $L_{\text{пр}}, = 0.2...0.25$  м ( $\varphi_{\beta} = \pm 0.9...0.95$ ).

#### Список литературы

1. Дубинкин Ю.М., Нигодюк В.Е. Модель рабочего процесса ЖРДМТ повышенной эффективности. Сб. трудов постоянно действующего НТ семинара. – Саратов: СВВКУ, 1996.