

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ СМЕШЕНИЯ НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ЖРДМТ

Дубинкин Ю.М., Нигодюк В.Е.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Анализ рабочего процесса ЖРДМТ, использующих самовоспламеняющиеся топлива, показал, что основным фактором, определяющим его экономичность является процесс смесеобразования (1). Особую роль при этом играют вопросы гидродинамики смешения струй и пелён окислителя и горючего. Последнее обуславливается вполне определённым временем существования жидкофазного контакта и перемешивания окислителя и горючего. Так как время периода жидкофазных реакций весьма мало ($\geq 10^{-4}$ с), то распад взаимодействующих пелён окислителя и горючего приводит к прекращению процессов перемешивания, реакций в жидкой фазе и, соответственно образованию промежуточных жидкофазных продуктов взаимодействия, которые, в конечном счёте, определяют возможность получения малых задержек воспламенения и высокую экономичность двигателя.

Вопросам распада струй и пелён жидкости посвящено огромное число теоретических и экспериментальных работ. Однако большинство работ посвящено вопросам распада автономных круглых струй.

Рассмотрим первоначально характерный случай распада пелён при малых числах Вебера W , образующихся при угле столкновения струй $\varphi = 180^\circ$.

Уравнение неразрывности при этом можно представить в виде зависимости толщины пелены:

$$h = \frac{d^2 V_0}{8r V} \quad (1)$$

где d – диаметр сопла форсунки и струи;

r – радиус от оси струи;

V_0 – начальная скорость струи;

V – скорость движения пелены на радиусе r .

Соответственно, уравнение энергии представим в виде:

$$\frac{d}{d\tau}(dE_k) = -\frac{d}{d\tau}(dE_\sigma) \quad (2)$$

где E_k – кинетическая энергия жидкости;

E_σ – энергия поверхностного натяжения жидкости.

Совместное решение уравнений неразрывности и энергии позволило найти уравнение движения плёнки жидкости, решение которого с

учётом малого градиента скоростей плёнки по радиусу $\frac{dV}{dr} \leq 1$ приводит

к выражению скорости плёнки:

$$\frac{V}{V_0} = -\frac{2a}{W} + \sqrt{4\left(\frac{a}{W}\right)^2 + \frac{4}{W} + 1} \quad , \quad (3)$$

где $a = \frac{2r}{D}$ - относительный диаметр плёнки;

$$W = \frac{\rho V_0^2 D}{\sigma} \quad - \text{число Вебера};$$

ρ - плотность жидкости;

σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Для нахождения уравнения, описывающего распад плёнки, используем граничные условия распада в виде интегрального соотношения по энергии и импульсу концевому участку с учётом того, что на нём образуются капли (плёнка распадается):

$$\rho 2\pi r^2 h D \frac{V_0^2}{2} = \rho \frac{V^2}{2} + \frac{4\sigma r}{\pi D^2} \frac{V}{V_0} \quad , \quad (4)$$

$$\frac{\rho V^2}{2} = \frac{\sigma}{2h} \quad , \quad (5)$$

Решение уравнения (3) с учётом граничных условий (4) и (5) позволило найти уравнение распада плёнки, из решения которого находим безразмерную длину распада плёнки:

$$a = 0.177\left(1 + \frac{4}{W}\right)^{\frac{1}{2}} W \quad , \quad (6)$$

Характерным является то, что безразмерная длина распада не зависит от соотношения плотностей (газ-жидкость) и числа Лапласа ($L_p = \frac{\rho r^3}{\mu^2}$), учитывающего вязкость жидкости. Сравнение полученных теоретических и экспериментальных результатов по соударяющимся струям воды под углом соударения 180° для области $W = (1...6) \cdot 10^2$ показали их хорошую сходимость.

При смесеобразовании в ЖРДМГ струи (пелёны) горючего и окислителя сталкиваются под углом $\varphi < 180^\circ$. В этом случае толщина плёнки будет зависеть также от азимутального угла φ .

Угловая расходонапряжённость в направлении угла при этом может быть представлена путём «эквивалентного изменения диаметра d исходной струи по азимутальному углу в виде:

$$q^i = \frac{\dot{m}}{2\pi} \frac{\sin^2 \varphi / 2}{1 + \cos^2 \varphi / 2 - 2 \cos \varphi / 2 \cos \psi}, \quad (7)$$

где \dot{m} - массовый расход компонента;

i - индекс окислителя и горючего.

Границы плёнки при её распаде и время распада в решающей степени определяются потерями кинетической энергии жидкости $E_{кж}$ за счёт трения и поверхностного натяжения. На базе полученных соотношений для выраженных в явном виде потерь на трение и поверхностное натяжение были определены локальные условия распада при минимальном течении жидкости для соответствующих ψ в виде:

$$1 - \frac{3\pi\nu D^2}{\varepsilon_v V \delta^3} = \frac{4\sigma}{\varepsilon\rho V^2 \sigma} \left(1 + \frac{4}{\pi} \frac{\delta^2}{D^2}\right) - \frac{4\sigma}{\rho D \varepsilon V^2}, \quad (8)$$

где $\varepsilon = \frac{E_{кж}}{E_k}$ - коэффициент потерь кинетической энергии;

$\varepsilon_v = \frac{V_y}{V}$ - коэффициент изменения скорости по азимутальному на-

правлению;

δ - толщина плёнки;

ν - кинематическая вязкость.

Решение (8) позволяет найти границу плёнки в зависимости от ψ при данном φ , которая достаточно хорошо соответствует полученным экспериментальным данным.

Важную роль в распаде взаимодействующих плёнок может играть разность скоростей окислителя и горючего, которая приводит к неустойчивости зоны контакта и распада плёнок. Рассмотрение этой задачи позволило найти время распада.

Анализ полученного уравнения для времени распада показал, что $\tau_p \approx U^{-2}$, где $U = |V_o - V_r|$.

На основе этого выявлены значения допустимых скоростей V (β_k), U (V). Для ЖРДМТ $V \approx 15 \dots 20$ м/с ($\beta_k \uparrow \rightarrow V \downarrow$) $U = 5 \dots 10$ м/с ($V \uparrow \rightarrow$

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 (τ_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