

УДК 629.76

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИСПАРЕНИЯ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ РАКЕТНОЙ КАМЕРЫ

© 2009 С.В. Епищенко, А.Н. Первышин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 18.02.2009

Предложена модель расчёта количества испарившейся части балласта жидкости, подводимого в камеру сгорания и влияние испарившейся части на теплофизические параметры продуктов сгорания.

Ключевые слова: модель, диспергирование, ракетная камера, сопло, пожаротушение.

Применение мелкодисперсного аэрозоля, состоящего из капель воды диаметром менее 100 микрон и инертных продуктов сгорания весьма эффективно для тушения пожаров в замкнутых объёмах. Образующийся аэрозоль охлаждает горящие поверхности с одновременным вытеснением кислорода из зоны горения. Эффективность тушения в значительной степени зависит от дисперсности распыла. Тушение пламени бензина в опытах достигалось при диаметре капель, не превышающем 100 микрон. В то же время для тушения горючих жидкостей с высокой температурой кипения, может успешно применяться вода и с большим диаметром капель [1].

Высокая концентрация энергии в струе ракетной камеры может использоваться при тушении пожаров. Предложена возможность получения огнетушащего аэрозоля путём организации распыливания жидкости инертными продуктами сгорания.

Сущность получения мелкодисперсного аэрозоля состоит в следующем: при истечении жидкости из капилляра в сопло, происходит её дробление ускоряющимся потоком продуктов сгорания. При этом на выходе из сопла ракетной камеры, формируется структура пожаротушающей струи, состоящая из продуктов сгорания, пара и диспергированной жидкости [2].

Для оценки возможности регулировки дисперсности распыла необходимо определить интенсивность испарения балласта и влияние испарившейся части на температуру струи, в зависимости от места ввода жидкости.

Рассмотрим движение сферических частиц жидкости, движущийся со скоростью  $\omega_i$  в потоке продуктов сгорания, скорость которого  $\omega_\alpha$ . В сечении "0" происходит диспергирование жид-

кости, а на сужающемся участке сопла (0-1) разгон образовавшихся капель до скорости  $\omega_{ikp}$ . В сечении "0" известны параметры частиц: диаметр  $d_{i0}$ , плотность вещества  $\rho_{i0}$ , расход жидкости  $\dot{m}_{ж}$ , также известны все термодинамические параметры потока продуктов сгорания: вязкость  $\eta_\alpha$ , давление  $p_\kappa$ , температура  $T_\alpha$ , плотность  $\rho_{\alpha 0}$ , расход  $\dot{m}_\alpha$  (рис.1).

При формировании модели были использованы следующие допущения:

1. Диспергирование жидкости происходит сразу за срезом капилляра, причём поток капель жидкости считаем монодисперсным а капли сферическими.

2. В минимальном сечении сопла газообразная часть рабочего тела всегда достигает скорости звука.

3. Скорость движения диспергированной фазы в минимальном сечении сопла определяется её взаимодействием на участке (0-1) (рис.1).

4. При расчёте времени прохождения капель участка (0-1) (рис.1) и определении скорости капли в минимальном сечении сопла испарение жидкости не учитывается.

5. При диспергировании температура жидко-

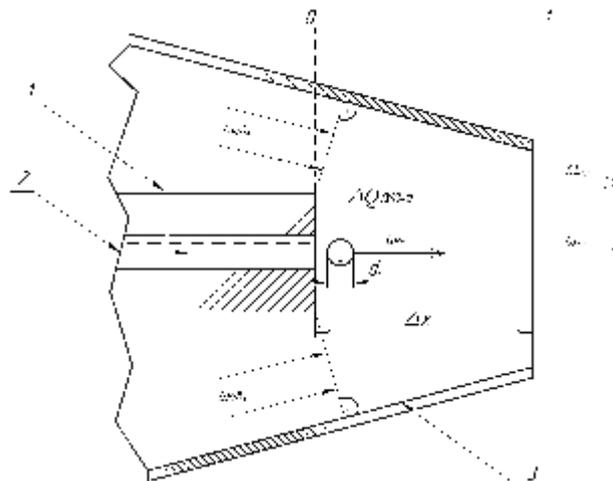


Рис. 1. Движение капли на дозвуковом участке 0-1

Епищенко Сергей Владимирович, аспирант.

Тел. (846) 267-45-73

Первышин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой.

Тел. (846) 267-45-73

сти не меняется, теплообмен происходит только с поверхностным слоем капли, без изменения температуры неиспарившейся части капли.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 – капилляр; 2 – жидкость; 3 – сопло;  $\omega_{\alpha\alpha x}$  – скорость продуктов сгорания, в месте выхода жидкости из капилляра;  $\omega_{\alpha\alpha k}$  – скорость жидкости на выходе из капилляра;  $\omega_{\alpha k p}$  – скорость продуктов сгорания в минимальном сечении сопла;  $\omega_{i k p}$  – скорость капель жидкости в минимальном сечении сопла;  $\Delta x$  – расстояние от сечения 0 до сечения 1;  $\Delta Q_{\alpha}$  – энергия, подводимая к единичной капле.

Модель расчёта временных и скоростных параметров движения капель жидкости предложена в статье [3], в ней получено аналитическое решение уравнения движения капель, основанное на воздействии на капли доминирующей аэродинамической силы и достижении в минимальном сечении сопла газовой частью потока скорости звука.

Так, скорость, которую приобретет капля жидкости, пройдя путь от места ввода (сечение 0), до минимального сечения (сечение 1), определяется уравнением:

$$\omega_{i k p} = 2 \cdot \left[ P \cdot \sqrt{P^2 - \bar{\omega}_{\alpha}} - (P - \bar{\omega}_{\alpha}) \right], \quad (1)$$

$$\text{где: } P = \frac{1}{2} \cdot \left( k + \frac{\bar{\omega}_{\alpha}}{k} + \frac{A_i \cdot \Delta x}{2} \right);$$

$$\bar{\omega}_{\alpha} = \frac{\omega_{\alpha\alpha x} + \omega_{\alpha k p}}{2} - \text{средняя скорость про-}$$

дуктов сгорания на участке (0-1);

$k$  – коэффициент расширения продуктов сгорания на участке (0-1);

$$A_i = \frac{\xi_1}{d_{i0}^{1.5}}; \xi_1 = \frac{3}{4} \cdot \frac{\psi_i \cdot \eta_{\alpha}^{0.5} \cdot \rho_{\alpha 0}^{0.5}}{\rho_i}; \psi_i = 13,$$

а время  $\Delta \tau_i$ , в течение которого капля жидкости переместится из сечения “0” в сечение “1” (рис. 1), уравнением:

$$\Delta \tau_i = \frac{2 \cdot \left( k - \sqrt{\bar{\omega}_{\alpha} - \omega_{i k p}} \right)}{A_i k \cdot \sqrt{\bar{\omega}_{\alpha} - \omega_{i k p}}}. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) используем при расчёте влияния испарившейся части жидкости на теплофизические параметры продуктов сгорания. Проанализируем теплообмен движущейся капли на участке движения (0-1). К капле за время  $\Delta \tau_i$  от окружающего высокотемпературного газа подводится энергия  $\Delta Q_{\alpha(0-1)}$ .

$$\Delta Q_{\alpha(0-1)} = \alpha^* \cdot F_{i0} \cdot (T_{\alpha} - T_s(p_k)) \cdot \Delta \tau_i, \quad (3)$$

где  $\alpha^*$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>К;  $F_{i0} = \pi \cdot d_{i0}^2$  – площадь поверхности капли в 0-м сечении, м<sup>2</sup>;

$d_{i0}$  – диаметр капли жидкости в 0-м сечении, м;

$T_{\alpha} = \varphi_{\beta}^2 \cdot T_k$  – температура продуктов сгорания в камере, К;

$T_k$  – теоретическая температура продуктов сгорания в камере, К;

$\varphi_{\beta}$  – полнота расходного комплекса;

$T_s(p_k)$  – температура насыщения воды в зависимости от давления, К;

$\Delta \tau_i$  – время прохождения капли от места ввода через капилляр до минимального сечения сопла, с.

Для определения коэффициента теплопередачи, от продуктов сгорания к капле жидкости, можно использовать зависимость Ренца-Маршала [4], которая для водяного пара, с учётом небольшой нестационарности, принимает вид:

$$Nu = 2 + 0,56 \cdot \sqrt{Re}. \quad (4)$$

где  $Re = \frac{\rho_{i0} \cdot d_{i0} \cdot (\bar{\omega}_{\alpha} - \bar{\omega}_i)}{\eta_{\alpha}}$  – число Рейнольдса;

$\eta_{\alpha}$  – вязкость продуктов сгорания, Па·с;

$\bar{\omega}_i = \frac{\Delta x}{\Delta \tau_i}$  – средняя скорость диспергированной жидкости на участке (0-1), м/с;

$Nu = \frac{\alpha^* \cdot d_{i0}}{\lambda_{cm}}$  – число Нуссельта;

$\lambda_{cm}$  – коэффициент теплопроводности среды, Вт/мК.

Энергия  $\Delta Q_{\alpha(0-1)}$  идёт на нагрев и испарение только поверхностного слоя массой  $\Delta m_i$  каждой капли:

$$\Delta m_i = \frac{\Delta Q_{\alpha(0-1)}}{B_i}; \quad (5)$$

$$B_i = \bar{c}_i \cdot (T_s(p_k) - T_{i0}) + r(p_k), \quad (6)$$

где:  $\bar{c}_i$  – средняя изобарная теплоёмкость жидкости, Дж/кгК;

$T_{i0}$  – начальная температура жидкости, К;

$r(p_k)$  – удельная теплота испарения, Дж/кг.

Тогда масса каждой капли в минимальном сечении сопла составит:

$$m_{i1} = m_{i0} - \Delta m_i, \quad (7)$$

где  $m_{i0} = \rho_{i0} \cdot V_{i0}$  – масса капли жидкости после ввода через капилляр, кг;

$\rho_{i0}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{i0}$  – объём капли, м<sup>3</sup>,  
а диаметр капли в минимальном сечении сопла, сечение 1:

$$d_{i1} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m_{i1}}{\pi \cdot \rho_{i1}}} \quad (8)$$

Причём на участке (0-1) одновременно находятся капли общей массой  $M_i$ :

$$M_i = \dot{m}_{жс} \cdot \Delta \tau_i \quad (9)$$

Тогда количество капель  $N_i$  на этом участке составит:

$$N_i = \frac{M_i}{m_{i0}} \quad (10)$$

Таким образом, можно определить массу испарившейся жидкости, на участке (0-1):

$$\Delta M_i = N_i \cdot \Delta m_i \quad (11)$$

и её относительное количество:

$$\Delta \bar{M}_i = \frac{\Delta M_i}{M_i} \quad (12)$$

Рассмотрим влияние испарившейся части балласта на теплофизические параметры продуктов сгорания. Определим коэффициент балластирования, как отношение массового расхода испарившейся жидкости к сумме массового расхода топлива и балласта:

$$q = \frac{\dot{m}_{исн}}{\dot{m}_\alpha + \dot{m}_{исн}} \quad (13)$$

где:  $\dot{m}_\alpha$  – массовый расход топлива, кг/с;

$$\dot{m}_{исн} = \frac{\Delta M_i}{\Delta \tau_i} \text{ – массовый расход испарившейся}$$

части балласта, кг/с.

Используя уравнение сохранения энергии, определим температуру торможения смеси продуктов сгорания и испарившейся части в камере:

$$T_k^* = \frac{\frac{1-q}{q} \cdot \bar{c}_{p\alpha} \cdot T_\alpha + \bar{c}_{pn} \cdot T_s(p_k) - r(p_k) - \bar{c}_i \cdot (T_s(p_k) - T_{ex})}{\frac{1-q}{q} \cdot \bar{c}_{p\alpha} + \bar{c}_{pn}} \quad (14)$$

где:  $\bar{c}_{p\alpha}, \bar{c}_{pn}$  – средняя изобарная теплоёмкость продуктов сгорания и насыщенного пара, Дж/кгК;  
 $\bar{c}_i$  – средняя теплоёмкость жидкости, Дж/кгК;  
 $T_{ex}$  – температура жидкости на выходе из капилляра, К.

Наличие балласта в камере сгорания приводит к изменению работоспособности рабочего тела за счёт изменения, как его температуры, так и состава. Молярную массу рабочего тела  $\mu_k$ , после испарения жидкости можно определить как:

$$\mu_k = \frac{1}{q \cdot \left( \frac{1}{\mu_i} + \frac{1-q}{q} \cdot \frac{1}{\mu_\alpha} \right)} \quad (15)$$

где  $\mu_i, \mu_\alpha$  – молярная масса жидкости и продуктов сгорания, кг/кмоль;

Расчёт испарения капли состоит из ряда итераций (j). Где рассматривается движение капли жидкости от выхода из капилляра до критического сечения сопла. Скорость движения продуктов сгорания на участке (0-1), в первой итерации определяется как среднее значение скорости в сечениях 0 и 1. В первой итерации не учитывается влияние испарившейся части жидкости на скорость и температуру в камере. Учёт этого влияния производится в последующих итерациях. Необходимо отметить, что значение температуры в камере сгорания  $T_\alpha$  остаётся неизменным. Во всех итерациях, производится последовательное изменение термодинамических параметров продуктов сгорания:

скорости  $\omega_{akpj}$ :

$$\omega_{akpj} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{R_\mu}{\mu_{kj}} \cdot T_{kj}^*} \quad (16)$$

где:  $R_\mu$  – универсальная газовая постоянная, Дж/кмольК;

молярной массы  $\mu_{kj}$  (15), температуры торможения  $T_{kj}^*$  (14), давления в камере сгорания  $p_{kj}$ :

$$p_{kj} = p_{kj-1} \cdot \frac{1-q_{j-1}}{1-q_j} \cdot \sqrt{\frac{T_{kj}^* \cdot \mu_{kj-1}}{T_{kj-1}^* \cdot \mu_{kj}}} \quad (17)$$

плотности  $\rho_{oj}$ :

$$\rho_{oj} = \frac{p_{kj} \cdot \mu_{kj}}{R_\mu \cdot T_{kj}^*} \quad (18)$$

Для определения  $\omega_{ikp}$  и  $\Delta \tau_i$  значения (16) и (18) подставляем в уравнения (1) и (2). Дальнейший расчёт ведётся по выше описанной методике.

В каждой итерации оценивается изменение  $T_{kn}^*$ . Расчёт завершается на j – итерации при относительном изменении температуры:

$$\varepsilon_{T_{kj}^*} = \frac{T_{kj} - T_{kj-1}}{T_{kj-1}} \leq 0,01 \quad (19)$$

Таким образом, предложенная модель позволяет определить количество испарившегося балласта, а также влияние испарившейся части жидкости на работоспособность рабочего тела камеры сгорания, а значит и огнетушащую способность аэрозоля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выбор оптимальных параметров распылённой воды для тушения горючих водонерастворимых жидкостей / *А.М. Борович* // Сборник научных трудов Пожаротушение на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. М.: ВНИИПО МВД СССР. 1991, С. 58–63.
2. *Епищенко С.В., Первышин А.Н.* Метод оценки диспергирования в генераторе мелкодисперсного аэрозоля // Известия Самарского научного центра РАН. 2008. Специальный выпуск. С. 76–79.
3. *Епищенко С.В., Первышин А.Н.* Модель движения монодисперсного газожидкостного потока в трансзвуковой части ракетной камеры // Вестник СГАУ. 2008. С. 121–125.
4. *Буланова Е.А., Первышин А.Н.* Труды четвертой Российской национальной конференции по теплообмену // Исследование движения дисперсной среды в недорасширенной струе продуктов сгорания – М.: Издательский дом МЭИ. 2006, Т. 6, С. 4.

## MODEL OF ESTIMATION OF INFLUENCE OF EVAPORATION OF THE DISPERGATED LIQUID ON THERMOPHYSICAL PARAMETERS OF PRODUCTS OF COMBUSTION OF ROCKET CHAMBER

© 2009 S.V. Epishchenko, A.N. Pervishin

Samara State Aerospace University

The model of calculation of amount of evaporating part of ballast of liquid is offered, combustion tricked into in a chamber and influence of evaporating part on the thermophysical parameters of products of combustion.

Key words: model, dispergating, rocket chamber, nozzle, pozharotushenie.