

УДК 629.7

Канд. техн. наук А.А. Панченко, канд. техн. наук М.А. Катренко,
канд. техн. наук Л.В. Пронь

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СКОРОСТНЫХ ПОТОКАХ

Представлены результаты экспериментальных исследований испарения жидкости в высокотемпературных, высокоскоростных потоках газов. Определены условия полного испарения жидкости при аэродинамическом способе ее распыления.

Подано результати експериментальних досліджень випаровування рідини у високотемпературних, високошвидкісних потоках газів. Визначено умови повного випаровування рідини при аеродинамічному способі її розпилювання.

The paper provides the results of experimental studies of liquid evaporation in high-temperature, high-velocity gas flows. Liquid full evaporation conditions are determined when an aerodynamic method for liquid atomization is used.

Введение. Разработка двигателей с более высокими энергетическими характеристиками по сравнению с существующими образцами техники требует совершенствования рабочих термогазодинамических процессов в их элементах, направленных на повышение эффективности использования топлива.

Все более широко используют высокоэффективные комбинированные двигатели на основе жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) или ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) в различных областях техники.

Разработка высокоскоростных торпед с применением прямоточных гидроракетных двигателей обусловила необходимость совершенствования гидродинамических процессов, связанных с течением газожидкостных потоков в их проточной части, и создания математических моделей для их расчета.

Например, при создании математической модели для гидроракетного двигателя необходимо для конкретных газодинамических параметров газового потока точно знать, при каких условиях течения газа и его параметрах испарится вода в проточной части камеры смешения полностью и на какой длине. Если испарение произойдет не полностью, то возникнет необходимость

определения массовой доли воды, которая осталась в жидком состоянии.

Кроме этого, техническая реализация повышения удельного импульса ЖРД путем впрыска воды в его закритическую часть сопла также представляет практический интерес.

Целью данной работы являлось экспериментальное определение диапазонов эффективного испарения жидкости в высокотемпературных, высокоскоростных потоках газов при различных условиях работы камеры сгорания.

Экспериментальная установка и условия проведения исследований. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, которая состоит: 1 – патрубок подачи воздуха высокого давления; 2 – узел измерения расхода воздуха \dot{m}_0 , его полной и статической температуры T^* , T , полного и статического давления P^* , P ; 3 – коллектор подачи горючего; 4 – камера сгорания; 5 – воспламенительное устройство камеры сгорания; 6 – трубопровод подачи воздуха к воспламенительному устройству; 7 – трубопровод подачи горючего; 8 – подвод электрической мощности к свече; 9 – наружный кожух; 10 – трубопровод подачи воды; 11 – регулировочный вентиль; 12 – распылительный канал; 13 – сопло; 14 – устройство измерения параметров парага-

зовой смеси – расхода $\dot{m}_П$, полной и статической температуры $T^*_П$, $T_П$, полного и статического давления $P^*_П$, $P_П$.

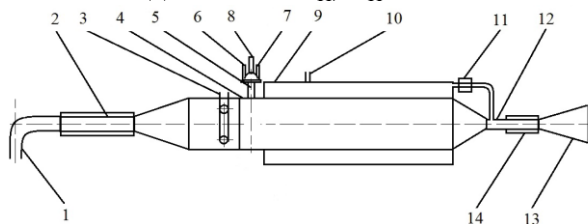


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

Экспериментальные исследования проводились следующим образом. Через патрубков 1 воздух подавался в камеру сгорания 4 и устройство запуска 5, горючее подавалось в коллектор 3 и зажигательное устройство 5, а в полость между кожухом 9 и камерой сгорания 4 через трубопровод 10 подавалась вода. Запуск камеры сгорания осуществлялся путем подачи электрической мощности к свече 8, после чего продукты сгорания из зажигательного устройства обеспечивали сгорание основного горючего в камере сгорания. В качестве горючего использовалась смесь газов пропана и бутана. В узле 2 проводились измерения параметров воздушного потока. Измерительная аппаратура имела класс точности измерения 0,5.

После достижения требуемого режима течения воздуха и продуктов сгорания открывался регулировочный вентиль 11, после чего вода поступала в распылительный канал 12.

Продукты сгорания и водяной пар из испарительного устройства подавались в сопло 13, после чего истекали в окружающую среду. Изменение расхода воды проводилось вентилем 11, а термогазодинамические параметры парогазовой смеси контролировались устройством измерения 14.

Таким образом, путем изменения условий подачи воздуха через патрубок 1 и воды через регулировочный вентиль 11 было проведено исследование условий испарения воды в высокотемпературном, высокоскоростном газовом потоке.

Основная часть. Теоретически суммарная полная энергия высокотемпературного, высокоскоростного потока при подводе в

него жидкости расходуется на ее нагрев до температуры кипения при данном давлении, испарение и перегрев парогазовой смеси до некоторой равновесной температуры

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma} &= \text{Hu} \eta \dot{m}_T = \dot{m}_B C_{p_B} (T_{\text{кип}} - T_{\text{под}}) + \\ &+ \dot{m}_B r + \dot{m}_B C_{p_{II}} (T_{\Gamma} - T_{\text{кип}}) + \\ &+ \dot{m}_O C_{p_O} (T_{\Gamma} - T_{\text{H}}) = \\ &= (\dot{m}_B + \dot{m}_O + \dot{m}_T) C_{p_{\Gamma}} (T_{\Gamma} - T_{\Gamma}), \end{aligned} \quad (1)$$

где \dot{m}_B – расход жидкости, кг/с; \dot{m}_T – расход топлива, кг/с; \dot{m}_O – расход воздуха, кг/с; Hu – удельная массовая теплотворная способность топлива, Дж/кг; η – коэффициент полноты сгорания топлива; r – скрытая теплота парообразования, Дж/(кг·К); Q_{Σ} – суммарный тепловой поток, Дж/с; T – температура, К; C_p – теплоемкость массовая при постоянном давлении, Дж/(кг·К); индексы:

z – относящиеся к продуктам сгорания; k – относящиеся к параметрам в камере сгорания; кип – кипения; n – относящиеся к условиям окружающей среды; под – относящиеся к условиям подачи.

Аналогичный подход рассмотрен при определении условий надежного охлаждения стенок камеры сгорания ЖРД наружным охлаждением с использованием завес охлаждения [1].

Расчет параметров рабочих тел осуществлялся исходя из уравнения баланса полной энергии.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе расход воздуха поддерживался постоянным, а расходы топлива и воды изменялись с целью определения предела испарения воды при различных получаемых температурах продуктов сгорания в камере сгорания.

На втором этапе расходы топлива, воды и воздуха изменялись. В частности, расходы воздуха и топлива изменялись таким образом, чтобы для коэффициента избытка окислителя в камере сгорания выполнялось условие $\alpha \geq 1$. Целью второго этапа исследований являлось определение минимальной скорости потока, при которой происходит полное испарение подаваемой воды.

В экспериментальных исследованиях первого этапа расход воздуха \dot{m}_o поддерживался постоянным и составлял 0,025 кг/с. Расход топлива \dot{m}_T варьировался в пределах от 0 до 0,0016 кг/с. Для каждого режима работы установки проводились измерения параметров в узлах измерений 2 и 14, когда при постоянном расходе воздуха устанавливался фиксированный расход топлива, а расход воды \dot{m}_B изменялся от 0 до 0,015 кг/с.

На основе результатов экспериментальных исследований получена зависимость массового расхода испаряемой воды от расхода топлива, представленная на рис. 2.

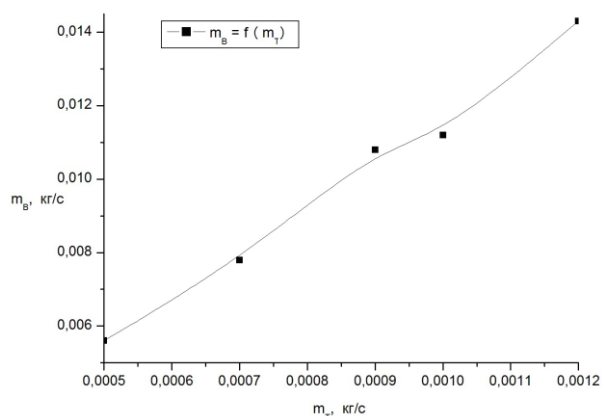


Рис. 2. Зависимость испаряемого массового расхода воды от массового расхода топлива

Данные были получены для расхода топлива, который поддерживался максимальным, а расход воды увеличивался до прекращения полного испарения и определялся по значению теоретической температуры T_n . На рис. 3 представлена зависимость температуры парогазовой смеси от массового расхода воды.

При экспериментальных исследованиях было замечено, что от располагаемого перепада давления зависит массовый расход испаряемой жидкости. Это выражается в том, что в низкоскоростном потоке при подводе тепловой энергии не вся масса

подводимой воды испаряется из-за малой площади ее поверхности.

Поэтому преобразование потенциальной энергии жидкости в кинетическую позволило аэродинамически раздробить сплошную истекающую струю на отдельные капли и тем самым увеличить площадь теплообмена.

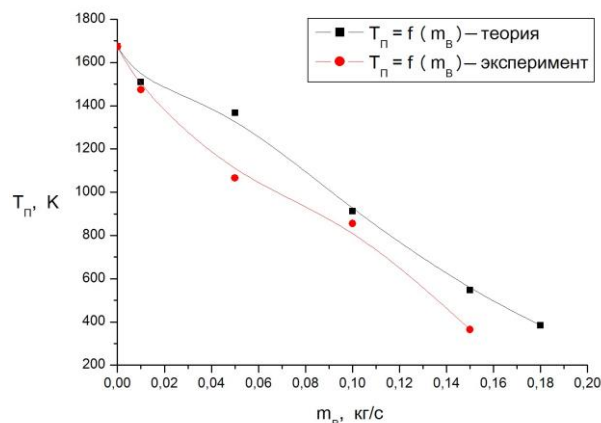


Рис. 3. Зависимость температуры парогазовой смеси от массового расхода воды

Используем уравнение сохранения энергии для струи жидкости, истекающей в полость испарения, и выразим потребную скорость жидкости, при которой происходит полное испарение в зависимости от перепада давления в контрольных сечениях, в виде [2–4]

$$C_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho} + C_1^2} \quad (2)$$

Начальная скорость жидкости в эксперименте изменялась от 0 до 0,5 м/с.

Получена зависимость массового расхода жидкости от располагаемого перепада давления в газожидкостной зоне испарения, представленная на рис. 4.

Из результатов экспериментальных исследований следует, что минимальный перепад давления, при котором наблюдается полное испарение воды в высокотемпературном потоке, составляет 1800 Па, что соответствует скорости жидкости в распылительном канале 131 м/с.

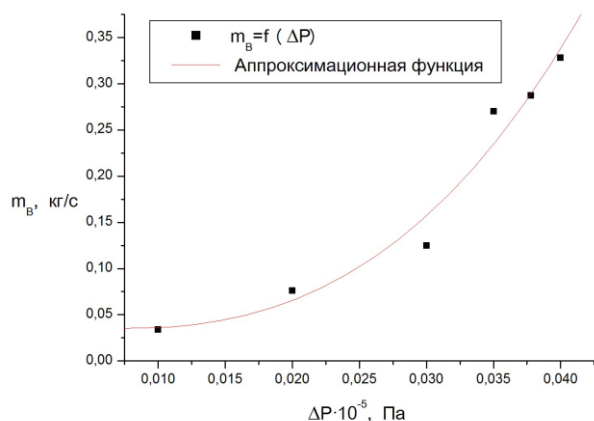


Рис. 4. Зависимость массового расхода воды от перепада давления в газожидкостном тракте

При перепаде давления в канале в интервале 1500 – 4500 Па рассчитать массовый расход воды можно, используя аппроксимационную зависимость, полученную по данным рис. 4, в таком виде:

$$\dot{m}_B = 0,04243 - 1,5236 \Delta P + 44,6625 (\Delta P)^2 + 4450,28 (\Delta P)^3. \quad (3)$$

Заключение. На основании экспериментального исследования можно сделать следующие выводы:

- процесс полного испарения жидкости в высокотемпературном потоке осуществляется при минимальной скорости потока 131 м/с;

- при скорости движения газового потока в канале со скоростью $V < V_{min}$ полного испарения жидкости не наблюдается;

- достигнутое максимальное значение скорости движения жидкости, при котором жидкость полностью испарялась в эксперименте, составляет $V_{max} = 210,8$ м/с;

- полученные результаты могут найти применение при проектировании прямоточных гидроракетных двигателей, а также парогазогенераторных установок наземного использования.

Список использованной литературы

1. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей: Учебник /Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. и др.; Под ред. В. М. Кудрявцева. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1983. – 703 с.
2. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. – М.: Госэнергоиздат, 1974.
3. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973.
4. Иевлев В. М. Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред. – М.: Наука, 1975.

Статья поступила 04.12.2013