

УДК 621.458:621.452.52

Канд. техн. наук М. А. Катренко, канд. техн. наук А. А. Панченко

Днепропетровский национальный университет, г. Днепропетровск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСХОДА ВОДЫ В КОМБИНИРОВАННОМ ГИДРОРЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ПОДАЧЕЙ ВОДЫ В ЗАКРИТИЧЕСКУЮ ЧАСТЬ СОПЛА

Излагаются результаты теоретических исследований системы подачи воды в закритическую часть реактивного сопла и ее испарение в комбинированном гидрореактивном ракетном двигателе. Предложен подход к определению оптимального расхода воды, подаваемой в закритическую часть сопла реактивного двигателя торпеды. В качестве критерия оптимума используется максимальное значение тяги двигателя.

Ключевые слова: реактивный двигатель, сопло, расход компонентов, оптимальное соотношение.

Введение

Создание эффективной двигательной установки для высокоскоростных торпед представляет важную техническую задачу. Специфичность работы такого двигателя обусловлена получением высоких значений тяги для требуемых скоростей движения торпеды при изменяющихся условиях окружающей среды. При подаче воды в закритическую часть реактивного сопла преследуется цель увеличения тяги двигателя и преобразование ее в полезную работу передвижения подводного аппарата. В процессе подачи воды и ее испарения в закритической части сопла, помимо чисто технических проблем, необходимо решить вопрос об определении оптимальной величины массового расхода испаряемой воды или ее относительного расхода.

Анализ последних исследований и публикаций

В [1] рассмотрены аспекты вдува газа и впрыска жидкости в реактивное сопло ракетного двигателя. Исследованы изменения энергетических параметров двигателя (тяга и удельный импульс), а также термодинамические параметры потока в зависимости от параметров вдува, и предложен коэффициент усиления. В [2–4] представлены результаты исследований впрыска жидкости в сверхзвуковой поток, показаны результаты по определению боковых сил в соплах ЖРД при впрыске компонентов топлива, изложены предложения и рекомендации по тепловому и конструкторскому проектированию узлов кольцевого вдува, исследована работоспособность камеры ЖРД при впрыске в закритическую часть окислительных компонентов топлива. В [5] изложены результаты экспериментальных исследований впрыска жидкости в высокотемпературный, ско-

ростной поток газа, определены условия полного испарения подаваемой жидкости.

Цель работы – проведение теоретических исследований, направленных на определение оптимального относительного расхода воды, подаваемой в закритическую часть сопла комбинированного гидрореактивного двигателя на основе активной ступени либо с использованием жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), либо ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ), при условии максимума тяги.

Основная часть

Используя опыт и результаты работы [6], предлагается модель гидрореактивного комбинированного ракетного двигателя для торпедного аппарата с системой подачи воды в закритическую часть сопла. Расчетная модель двигателя изображена на рис. 1.

Математическая модель

Основные допущения приняты следующие:

- комбинированный гидрореактивный двигатель перемещает торпеду на постоянной глубине;
- двигатель находится в кормовой части торпеды, причем нет процессов теплообмена между элементами двигателя и внутренней полостью торпеды, где он размещен;
- процесс расширения газов в реактивном сопле происходит адиабатно;
- топливо может быть использовано как в жидком, так и в твердом состоянии и для продуктов его сгорания известны физические параметры;
- тяга двигателя и массовый расход топлива известны;
- статические давления на срезе реактивного сопла и окружающей среды равны.

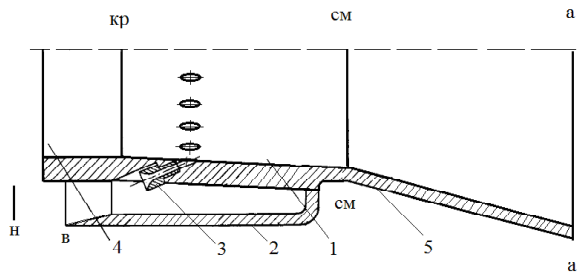


Рис. 1. Схема комбинированного ракетного двигателя с дискретной подачей воды в закритическую часть сопла:

1 – камеры смешения, 2 – патрубок забора воды, 3 – пассивные сопла, 4 – высокотемпературный, высоконапорный поток газов, 5 – реактивное сопло

Принятые обозначения:

a – скорость звука, [м/с];

C_p – теплоемкость при постоянном давлении, [Дж/кг К];

F – площадь, [м²];

k – показатель адиабаты;

m – массовый расход, [кг/с];

p – статическое давление, [Па];

P – тяга, [Н];

R – газовая постоянная, [Дж/кг К];

r – скрытая теплота парообразования, [Дж/кг];

T – температура, [К];

W – скорость, [м/с];

φ_C – коэффициент скорости сопла.

Индексы:

a – соответствующие срезу сопла;

$в$ – воды;

$гор$ – горючего;

$к$ – соответствующие параметрам в камере сгорания;

$кр$ – критические;

$о$ – окислителя;

$п$ – соответствующие параметрам пара;

$см$ – соответствующие параметрам смешения.

Тяга двигателя в общем случае определяется из соотношения [7]:

$$P_{ЭФ} = (m_O + m_{ГОР}) \cdot W_A + F_A \cdot (p_A - p_h),$$

а с учетом принятых допущений:

$$P_{ЭФ} = (m_O + m_{Г}) \cdot W_A.$$

При подаче воды в полость сопла и ее испарения, будут изменяться физические свойства газовой смеси:

- газовая постоянная:

$$R_{CM} = \frac{m_B \cdot R_{П} + m_{\Sigma} \cdot R}{(m_{\Sigma} + m_B)} = \frac{n \cdot R_{П} + R}{(1+n)};$$

- показатель адиабаты:

$$k_{CM} = \frac{m_B \cdot k_{П} + m_{\Sigma} \cdot k}{(m_{\Sigma} + m_B)} = \frac{n \cdot k_{П} + k}{(1+n)},$$

где относительный расход воды будет равен

$$\frac{m_B}{m_{\Sigma}} = n.$$

Приведенная скорость парогазовой смеси на выходе из сопла по адиабатным параметрам:

$$\lambda_{CSA} = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{p_h}{p_A}\right)^{\frac{k_{CM}-1}{k_{CM}}}\right] \cdot \frac{k_{CM}+1}{k_{CM}-1}} = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\frac{k_{CM}-1}{k_{CM}}}\right] \cdot \frac{k_{CM}+1}{k_{CM}-1}}.$$

Действительная приведенная скорость газовой смеси на выходе из сопла определяется из соотношения: $\lambda_A = \lambda_{CSA} \cdot \varphi_C$.

Скорость истечения смеси газов из реактивного сопла:

$$W_A = \lambda_A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{CM}}{k_{CM}+1} \cdot R_{CM} \cdot T_{CM}^*}.$$

Подставим соотношение для приведенной скорости газов в формулу скорости истечения, получим:

$$W_A = \varphi_C \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{CM}}{k_{CM}-1} \cdot R_{CM} \cdot T_{CM}^* \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{\frac{k_{CM}-1}{k_{CM}}}}\right)}.$$

Найдем относительную тягу двигателя, как отношения тяги двигателя при впрыске воды в закритическую часть сопла к тяге без впрыска, в виде:

$$\bar{P} = (1+n) \cdot \frac{\varphi_C'}{\varphi_C} \cdot \sqrt{\frac{k_{CM}}{k_{CM}-1} \cdot \frac{k-1}{k} \cdot \frac{R_{CM}}{R} \cdot \frac{T_{CM}^*}{T_K^*}} \times \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{\frac{k_{CM}-1}{k_{CM}}}}\right)}}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}}\right)}}.$$

Из уравнения сохранения энергии имеем:

- энергия впрыскиваемой воды:

$$Q_B = m_B \cdot C_{pB} \cdot T_B;$$

- энергия газов, полученных в камере сгорания двигателя: $Q_{Г} = m_{Г} \cdot C_{pГ} \cdot T_{Г}$;

- суммарная энергия смеси:

$$Q_{\Sigma} = Q_B + Q_{Г} = m_B \cdot C_{pB} \cdot T_B + m_{Г} \cdot C_{pГ} \cdot T_{Г}.$$

В свою очередь, при подаче воды часть энергии расходуется на подогрев воды до температуры испарения при давлении газов в месте подачи, испарение и подогрев пара до температуры парогазовой смеси:

$$Q_{\Sigma} = m_B \cdot r + C_{pII} \cdot m_B \cdot (T_{исп(р)} - T_B) + C_{pCM} \cdot (m_B + m_{\Sigma}) \cdot T_{CM}.$$

Приравняв суммарные энергии, выразим температуру парогазовой смеси:

$$T_{CM} = \frac{C_{pI} \cdot T_K + C_{pB} \cdot n \cdot T_B - n \cdot r - C_{pII} \cdot n \cdot (T_{исп(р)} - T_B)}{C_{pCM} \cdot (1+n)}.$$

Тогда выражение для определения относительной тяги двигателя можно записать в виде:

$$\bar{P} = (1+n) \cdot \frac{\varphi_{C'}}{\varphi_C} \cdot \sqrt{\frac{\frac{n \cdot k_{II} + k}{(1+n)} \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \cdot \left[\frac{n \cdot R_{II} + 1}{(1+n)}\right]}{\frac{n \cdot k_{II} + k}{(1+n)} - 1}} \times \sqrt{\frac{C_{pI} \cdot T_K + C_{pB} \cdot n \cdot T_B - n \cdot r - C_{pII} \cdot n \cdot (T_{исп(р)} - T_B)}{C_{pCM} \cdot (1+n) \cdot T_K}} \times \sqrt{\frac{1 - \frac{1}{\left(\frac{n \cdot k_{II} + k}{(1+n)} - 1\right)}}{\varepsilon' \cdot \frac{n \cdot k_{II} + k}{k \cdot (1+n)}}} \times \sqrt{\frac{1 - \frac{1}{\varepsilon \cdot k}}{\varepsilon \cdot k}}.$$

На рис. 2–4 представлены зависимости относительной тяги двигателя от относительного расхода воды для различных значений температуры в камере сгорания, газовой постоянной и показателя адиабаты продуктов сгорания.

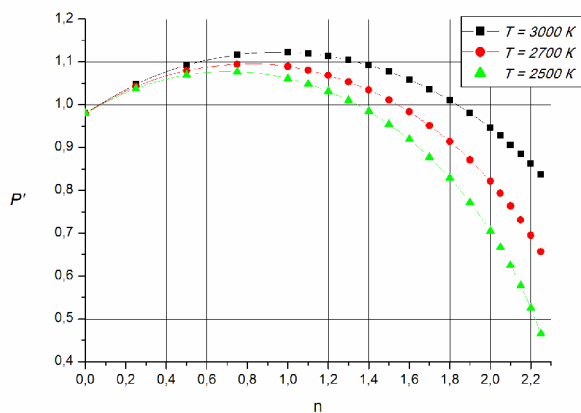


Рис. 2. Зависимости относительной тяги двигателя \bar{P} от относительного расхода воды n , и температуры в камере сгорания T_K

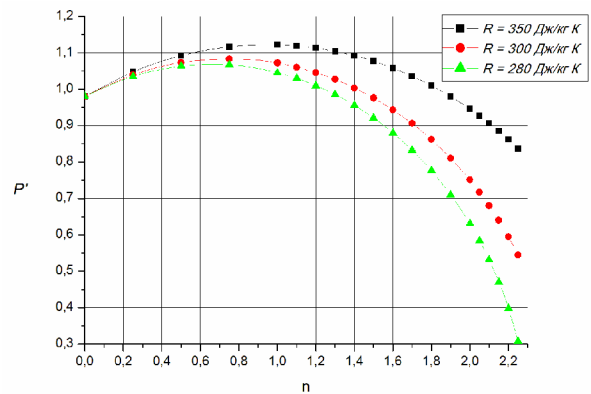


Рис. 3. Зависимости относительной тяги двигателя \bar{P} от относительного расхода воды n и газовой постоянной продуктов сгорания R

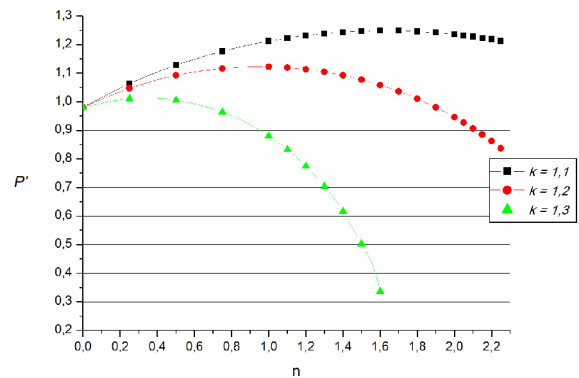


Рис. 4. Зависимости относительной тяги двигателя \bar{P} от относительного расхода воды n и показателя адиабаты продуктов сгорания k

Данные зависимости получены для $m_{\Sigma} = 10$ кг/с, $\varepsilon = 16,667$. Из полученной зависимости относительной тяги двигателя можно получить оптимальный относительный расход воды, подаваемый на испарение в закритическую часть сопла, если ее продифференцировать и приравнять 0,

$\frac{\partial \bar{P}}{\partial n} = 0$. В результате дифференцирования получим выражение (1).

Анализ полученного выражения показал, что получить зависимость оптимального относительного расхода воды от параметров рабочего процесса гидрореактивного двигателя алгебраическим путем не представляется возможным. Решение уравнения для конкретных параметров может быть получено, например, графическим способом.

Анализ полученных результатов

Как видно из полученных графических зависимостей, оптимальные относительные расходы для относительной тяги зависят от параметров рабочего процесса в камере сгорания двигателя.

$$\left(\frac{\left(\frac{n+1}{\varepsilon^{k+nk_{II}} - \varepsilon} \right) (k-k_{II})(k-1+n(k_{II}-1))(C_{pT}T_{\Gamma} + nC_{pB}(2T_B - T_{II}) - nr)}{\varepsilon(k+nk_{II})} + \right. \\
 + \frac{2 \left(\frac{n+1}{\varepsilon^{k+nk_{II}} - \varepsilon} \right) (k-1+n(k_{II}-1))(k-1+n(k_{II}-1))(C_{pT}T_{\Gamma} + nC_{pB}(2T_B - T_{II}) - nr)}{\varepsilon(1+n)} - \\
 + \frac{2 \left(\frac{n+1}{\varepsilon^{k+nk_{II}} - \varepsilon} \right) (k-1+n(k_{II}-1))(k+1+nk_{II})(R-R_{II})(C_{pT}T_{\Gamma} + nC_{pB}(2T_B - T_{II}) - nr)}{\varepsilon(1+n)(R+nR_{II})} + \\
 + \frac{1}{\varepsilon(k+nk_{II})(R+nR_{II})} \times \\
 \left. \times \left[\frac{\left(\frac{n+1}{\varepsilon^{k+nk_{II}} - \varepsilon} \right) (k+1+n+nk_{II})(C_{pT}(-R_{II}k^2 + k(R_{II} - R - 2nk_{II}R_{II}) + \right. \right. \\
 + k_{II}(R+n(2+n-nk_{II})R_{II}))T_{\Gamma} + C_{pB}(Rk^2 + k_{II}n^2((k_{II}-1)R + R_{II}) + \\
 + k((2n(k_{II}-1)-1)R - R_{II}n^2))(2T_B - T_{II}) + (-Rk^2 - k_{II}n^2)((k_{II}-1)R + R_{II}) + \\
 \left. \left. + k(R+2nR-2nk_{II}R + R_{II}n^2)\right) \varepsilon \right] + \\
 \left. + \frac{\varepsilon^{\frac{1-k+n-nk_{II}}{k+nk_{II}}}}{\varepsilon^{k+nk_{II}}} (k-k_{II})(k-1+n(k_{II}-1))(k+1+nk_{II})(C_{pT}T_{\Gamma} + nC_{pB}(2T_B - T_{II}) - nr) \ln(\varepsilon) \right) \\
 \left. \right) / (k+nk_{II})^2 = 0. \quad (1)$$

Проведенные исследования показали, что наибольшее влияние на величину оптимального относительного расхода воды оказывают параметры газового потока k , R и температура в камере сгорания T_K . Чем большими будут эти величины, тем большие значения будут для оптимумов относительных расходов воды.

Выводы

1. В результате проведенных исследований можно констатировать, что для гидрореактивного двигателя торпеды, в закритическую часть которого подается забортная вода, существует оптимальный расход жидкости, который определяет максимум тяги и его величина в большей мере зависит от теплоемкости и теплосодержания продуктов сгорания в камере сгорания.

Из зависимости относительной тяги гидрореактивного двигателя следует, что для относительного удельного импульса аналогичного оптимума расхода воды не существует. Максимальный удельный импульс соответствует случаю, когда температура газов будет максимальна, т. е. без подачи воды в проточную часть сопла. При подаче воды в закритическую часть сопла температура парогазовой смеси уменьшается, что приводит к уменьшению относительного удельного импульса двигателя.

Список литературы

1. Шишков А. А. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. Справочник / Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В. — М. : Машиностроение, 1989. — 240 с.
2. Коваленко Н. Д. Исследование интерцепторов с впрыском жидкости в сверхзвуковой поток / Н. Д. Коваленко, В. В. Харитонов. Техническая механика ракетно-космических систем. — Сб. науч. трудов ИТМ НАНУ и НКАУ. — Киев : Изд. «Наук. думка», 1986. — Вып. 2. — С. 150 — 153.
3. Определение боковых сил в сопле ЖРД при впрыске компонентов топлива в сверхзвуковую часть сопла по телеметрической информации летных испытаний / [Н. Д. Коваленко, В. Н. Шнякин, О. А. Аксюта и др.] Космическая техника. Ракетное вооружение. — ГП «КБ «Южное». — 2008. — № 1. — С. 91—105.
4. Коваленко Н. Д. О работоспособности камеры ЖРД при впрыске в сверхзвуковую часть сопла окислительного компонента топлива / [Н. Д. Коваленко, А. В. Макаров, О. Е. Аксюта, Е. Л. Токарева] // Космическая техника. Ракетное вооружение. — Днепропетровск : ГП «КБ «Южное». — 2010. — № 1. — С. 86—102.

5. Панченко А. А. Результаты экспериментальных исследований испарения жидкости в высокотемпературных скоростных потоках / Панченко А. А., Катренко М. А., Пронь Л. В. // Космическая техника. Ракетное вооружение. – Днепропетровск : ГП «КБ Южное». – 2014. – № 2, – С. 66–69.
6. Аркадов Ю. К. Компактный газовый эжектор большой степени сжатия с расположением сопла по спирали / Аркадов Ю. К. Ученые записки ЦАГИ. Том 15. – 1984. – № 6. – С. 35–42.
6. Васильев А. П. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / Васильев А. П., Кудрявцев В. М. и др. – М. : Высшая школа, 1975. – 656 с.

Поступила в редакцию 15.02.2016

Катренко М.О., Панченко А.А. Визначення оптимальної відносної витрати води у комбінованому гідрореактивному двигуні з подачею води у закритичну частину сопла

Викладаються результати теоретичних досліджень системи подачі води в закритичну частину реактивного сопла і її випаровування у комбінованому гідрореактивному ракетному двигуні. Викладений похід до визначення оптимальної витрати води, що подається в закритичну частину сопла. У якості критеріїв оптимуму використовується максимальне значення тяги двигуна.

Ключові слова: реактивний двигун, сопло, витрата компонентів, оптимальне співвідношення.

Katrenko M., Panchenko A. Definition optimal relatively consumption of water in combined hydrojet rocket engine with feed water in supercritical part of the nozzle

The results of theoretical researches of a supply system of water in a supercritical part of a supersonic nozzle and its evaporation in a combined hydrojet rocket engine are presented. The campaign to definition of the optimum consumption of water submitted to a supercritical part of the nozzle is stated. As the criteria of an optimum the maximum values of thrust are used.

Key words: Jet engine, the nozzle, the consumption of components, optimum ratio.