

УДК 621.455.2

К вопросу об оптимизации подвода тепла и длины камеры электротермического ускорителя

Кондаков Егор Евгеньевич

kondakov@bmstu.ru

Аристархов Д.А.

aristarhovda@bmstu.ru

Онуфриев В.В.

onufryev@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Цель работы — оптимизация теплоподвода в камере постоянного профиля в зависимости от геометрических характеристик участка теплоподвода. Критерием является условие достижения скорости звука потоком в конце участка теплоподвода. Получены аналитические зависимости распределения скорости и температуры потока по длине участка теплоподвода в зависимости от удельного энерговыклада, определена величина подводимого к потоку тепла, которая необходима для достижения скорости звука в конце участка теплоподвода в камере постоянного профиля.

Ключевые слова: участок теплоподвода, скорость звука, камера постоянного профиля, поток рабочего тела, электротермический ускоритель, мощность, теплота

Введение. Электротермические ускорители (ЭТУ) являются перспективным классом электроракетных ускорителей. Активное развитие ЭТУ связано с их эффективностью по критериям надежности, стоимости, простоте конструкции, а также малому энергопотреблению [1, 2]. Актуальность обусловлена большей энергетической эффективностью тяги ЭТУ (снижением цены тяги) по сравнению с электростатическими электроракетными двигателями [3–6].

Модель оптимизации энергоподвода для ускорения потока в камере постоянного профиля с равномерным теплоподводом. Разработанная модель ускорения потока основывается на работах [5–8], в которых рассмотрен метод определения тепловой мощности, которую необходимо передать потоку рабочего тела для достижения им скорости звука в цилиндрической тепловой камере ЭТУ. В качестве приближения авторами принят закон изменения теплоподвода по длине канала равномерным — $q(x) = \text{const}$.

Особенностью разработанной модели является возможность расчета нагрева и ускорения рабочего тела до местной скорости звука в конце участка теплоподвода, что позволяет выполнить камеру без конфузторного участка перед соплом Лавалля. Еще одним из отличий является учет длины участка теплоподвода камеры постоянного профиля l_s , обеспечивающей достижение потоком рабочего тела скорости звука в конце участка теплоподвода. Этот геометрический параметр позволяет провести расчет и оптимизацию термодинамических и газодинамических параметров потока что, в конечном счете, влияет на эффективность теплового ускорения потока (тяговый и энергетический КПД ЭТУ). Варьирование геометрических характеристик ЭТУ при раз-

личных рабочих условиях позволяет подобрать оптимальный с точки зрения эффективности ускорения КПД ЭТУ для разных рабочих тел и уровней подводимой к потоку мощности.

Результаты расчета и анализ. С помощью разработанной модели было оценено влияние начальной температуры, расхода рабочего тела и диаметра канала на температуру $T(x)$ и скорость рабочего тела $W(x)$, а также на необходимую длину участка теплоподвода l_s .

Результаты расчета среднемассовой температуры потока рабочего тела $T(x)$ в процессе ускорения с равномерным теплоподводом $q(x)$ по длине в камере постоянного профиля показывают, что по мере дополнительного ввода энергии относительный прирост температуры снижается с 30 % в начале участка до 8 % в конце участка теплоподвода. Увеличение начальной температуры потока позволяет лишь несколько сократить длину участка теплоподвода l_s , необходимую для разгона потока до скорости звука, и уменьшить требуемое количество теплоты Q_s . Это связано с тем, что начальная температура потока влияет на его плотность, которая, в свою очередь, влияет на начальную скорость при заданном расходе.

При увеличении расхода на 20 % длина участка теплоподвода l_s цилиндрической камеры, необходимая для разгона рабочего тела до скорости звука, увеличивается на 60 %. Увеличение расхода рабочего тела существенно влияет на длину участка теплоподвода l_s .

Изменение диаметра канала при сохранении расхода рабочего тела оказывает наибольшее влияние на длину участка теплоподвода. При уменьшении диаметра канала на 13 % длина участка теплоподвода цилиндрической камеры l_s , необходимая для разгона рабочего тела до скорости звука, уменьшается на 80 %.

Заключение. Используя вышеописанную модель ускорения потока с равномерным теплоподводом, можно оптимизировать его характеристики, позволяющие повысить эффективность ЭТУ при реализации различных режимов течения потока и обеспечения в критическом сечении достижение скорости звука.

Список источников

- [1] Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. *Электрические ракетные двигатели космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1975, 273 с.
- [2] Квасников Л.А., Латышев Л.А., Пономарев-Степной Н.Н., Севрук Д.Д., Тихонов В.Б. *Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов*. Москва, Изд-во МАИ, 2001, 480 с.
- [3] Назаренко И.П., Никритюк П.А. Расчет характеристик водородной дуги с учетом термохимической неравновесности. *Теплофизика высоких температур*, 1998, № 36, вып. 5, с. 693–699.

-
- [4] Назаренко И.П., Никритюк П.А. Влияние диаметра дугового канала на переносные свойства водородной электродуговой плазмы. *Теплофизика высоких температур*, 2002, № 40, вып. 6, с. 861–866.
 - [5] Аристархов Д.А., Кондаков Е.Е., Онуфриев В.В., Ивашкин А.Б. Параметры водородной плазмы в электродуговом канале. *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*, 2024, вып. 693, с. 80–93.
 - [6] Онуфриев В.В., Сидняев Н.И., Говор С.А. Об энергетической эффективности электротермического двигателя с дополнительным подводом тепла для малого космического аппарата. *Известия академии наук. Энергетика*, 2018, № 5, с. 92–100.
 - [7] Квасников А.В. *Теория жидкостных ракетных двигателей*. Ленинград, Судпромгиз, 1959, 538 с.
 - [8] Фаворский О.Н., Фишгойт В.В., Янтовский Е.И. *Основы теории космических электрореактивных двигательных установок*. Москва, Высшая школа, 1978, 383 с.