

03

Экспериментальное и аналитическое исследование нагрева и испарения металла в индукторе в контексте проблемы переработки космического мусора и создания универсального испарительного космического двигателя

© И.О. Тепляков¹, Д.А. Виноградов¹, В.В. Глазков^{1,2}, К.С. Ковешников^{1,2}, К.Г. Кубриков¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия

E-mail: igor.teplyakov@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 сентября 2024 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2024 г.

Принято к публикации 25 ноября 2024 г.

Экспериментально и аналитически исследованы процессы нагрева и испарения металла в индукционном нагревателе. Измерена реактивная тяга, создаваемая в результате испарения материала в камере низкого давления, также проведены аналитические оценки тяги. Экспериментальные результаты находятся в удовлетворительном согласии с теоретическими оценками. Полученные данные предполагается использовать для разработки двигательной установки испарительного типа с космическим мусором в качестве рабочего тела.

Ключевые слова: космический мусор, космический двигатель, нагрев, индуктор, цинк, испарение, реактивная тяга.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59933.20113

Проблемы, связанные с загрязнением орбиты Земли космическим мусором, беспокоят научное сообщество с 1957 г., когда в СССР был запущен первый в мире искусственный спутник. По состоянию на 2023 г. количество объектов, доступных для наблюдения с Земли, составляет более 30 тыс. А общее количество объектов размером более 1 см превышает миллион [1]. При этом скорость объектов космического мусора на орбите Земли достигает 7 km/s; следовательно, столкновение космического аппарата с мусором будет иметь фатальные последствия. Таким образом, проблема утилизации или переработки космического мусора является чрезвычайно важной для космической отрасли [2–4]. Во-первых, космический мусор можно уничтожить с помощью лазера, превращая его в плазму, во-вторых, можно выполнять сбор мусора автономными космическими аппаратами и уничтожать его в верхних слоях атмосферы Земли [5]. Мы считаем, что уничтожение космического мусора является не только чрезвычайно дорогостоящим, но и крайне нерациональным путем. В настоящей работе мы предлагаем использовать космический мусор в качестве источника массы для создания тяги космических аппаратов, такой подход требует создания нового универсального ракетного двигателя [6,7].

Мы рассматриваем так называемый испарительный двигатель (рис. 1). Двигатель работает следующим образом: рабочая жидкость нагревается индукционным нагревателем до точки кипения, а пары выбрасываются через сопло и создают реактивную тягу. Индукционный нагрев является популярным и общепринятым методом

нагрева, известным своим применением в различных технических областях [8,9]. Мы предлагаем использовать индукционный нагрев по следующим причинам:

- космический мусор в основном состоит из металла;
- индукционный нагрев является бесконтактным, что значительно упрощает конструкцию рабочей исследуется камеры;
- космический мусор, состоящий из непроводящих включений, может быть нагрет внутри электропроводящей графитовой рабочей камеры.

В настоящей работе исследуется применимость концепта ракетного двигателя с индукционным нагревом рабочего тела в камере низкого давления.

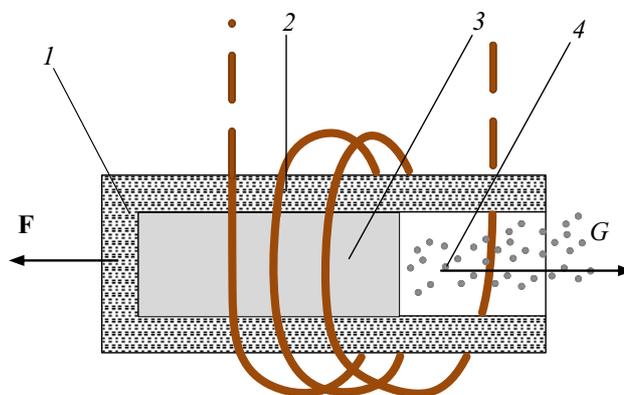


Рис. 1. Схема испарительного двигателя: 1 — рабочая камера, 2 — индуктор, 3 — фрагмент космического мусора, 4 — пары металла, F — реактивная тяга, G — поток массы.

Таблица 1. Свойства цинка (*s* — в твердом состоянии, *l* — в жидком)

Параметр	<i>T</i> , К							
	300	400	500	600	692.73 (<i>s</i>)	692.73 (<i>l</i>)	800	1000
C_p , J/(kg · K)	389	402.6	417.6	436.1	452.7	480.3	480.3	480.3
$\rho \cdot 10^8$, $\Omega \cdot m$	6	8	10.5	13	16	—	37.5	—

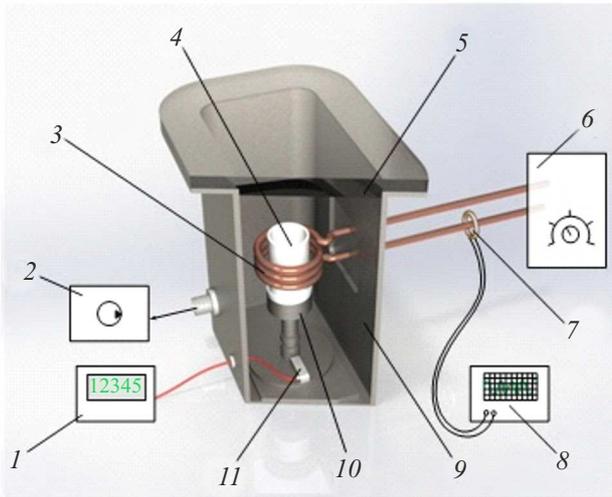


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — весы, 2 — форвакуумный насос, 3 — индуктор, 4 — сопло, 5 — крышка камеры низкого давления, 6 — блок управления индуктором, 7 — трансформатор тока, 8 — осциллограф, 9 — камера низкого давления, 10 — подставка, 11 — тензодатчик.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. В керамическом сопле ($d = 14$ мм) 4 находился цинк массой $m = 10$ г. Выбор цинка в качестве рабочего материала обусловлен тем, что цинк является легкокипящим металлом, удобным для проведения экспериментов, другие легкокипящие металлы либо очень активны (калий, натрий, цезий), либо ядовиты в парообразном состоянии (ртуть). Вокруг сопла располагался индуктор 3 диаметром $d_i = 37$ мм и высотой $h_i = 37$ мм. Сопло располагалось на подставке 10, которая была прикреплена к тензодатчику 11. Для контроля тока использовался трансформатор тока 7 и осциллограф 8. В начале эксперимента из камеры низкого давления 9 откачивался воздух до давления ~ 1800 Па, затем цинк разогревался с помощью индуктора и начинал испаряться. Пар цинка выходил из сопла, создавая тягу, которая фиксировалась тензодатчиком НХ-711. Датчик был подключен к микроконтроллеру Arduino MEGA 2560, с помощью которого данные обрабатывались и выводились на цифровой экран. Система измерений веса была протарирована с использованием грузов Г-2-210 (второй класс точности), имеющих точность не менее 0.03 % (заявлена точность 0.0003 г для груза массой 1 г). Разброс показаний в течение минуты составлял не более

± 0.1 г, что можно трактовать как точность измерения веса.

Для оценки мощности, которая передавалась металлу, были проведены предварительные эксперименты. Цинк нагревался при атмосферном давлении до температуры кипения 907°C , при этом температура измерялась хромель-алюмелевой термопарой. Для оценки мощности, затраченной на нагрев, использовался участок термограммы в интервале $880\text{--}900^\circ\text{C}$. Средняя мощность N , передаваемая металлу, вычислялась по формуле $N = \frac{m}{\tau} \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$, где T_1 и T_2 — начальная и конечная температуры, C_p — теплоемкость, τ — время нагрева. В табл. 1 приведена теплоемкость и удельное электрическое сопротивление цинка.

В табл. 2 представлена экспериментально измеренная мощность, сообщаемая металлу в зависимости от электрического тока, протекающего в индукторе.

Отметим, что в табл. 2 приведена именно полезная поглощенная мощность, затраченная на нагрев материала в сопле, часть энергии теряется на излучение, нагрев сопла и воздуха. При пониженном давлении поглощенная мощность будет несколько больше за счет отсутствия конвекции, что и показывает режим 4, реализованный при давлении 1800 Па. Также ток, индуцированный в нагреваемом объекте, сложным образом зависит от его размеров и электропроводности.

Приведем теоретические оценки создаваемой тяги. В нашем случае пары цинка находятся при давлении $P = 1866$ Па (соответствует среднеинтегральному давлению во время эксперимента), которому на кривой насыщения соответствует температура 881 К (608°C) [10]. Полагаем, что удельная теплота парообразования цинка $L = 1.74 \cdot 10^6$ J/(kg · K), удельная теплоемкость паров цинка $R = 127$ J/(kg · K), $C_p = 317.9$ J/(kg · K). Диаметр сопла равен 14 мм, а площадь поперечного сечения $1.54 \cdot 10^{-4}$ м². Тогда массовый расход паров цинка $G = N/L = 1.38 \cdot 10^{-4}$ kg/s, максимальная скорость паров цинка будет достигаться

Таблица 2. Мощность нагрева цинкового образца

Режим	Ток индуктора <i>I</i> , А	Мощность <i>N</i> , W
1	255	41 ($P = 101$ kPa)
2	336	81 ($P = 101$ kPa)
3	431	205 ($P = 101$ kPa)
4	381	240 ($P = 1800$ Pa)

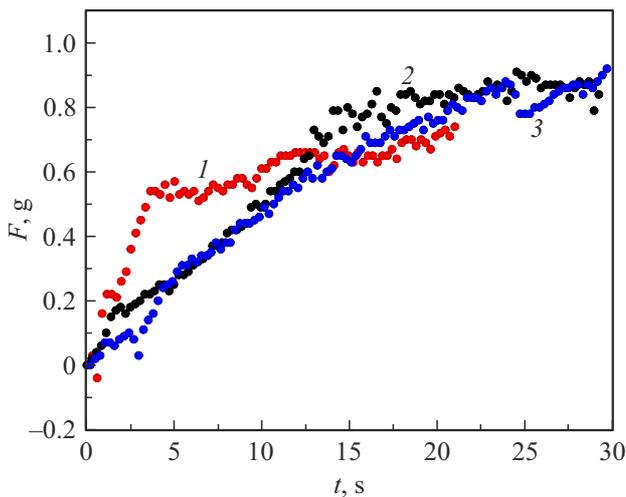


Рис. 3. Зависимость реактивной тяги от времени при давлении $P = 1866$ Па. Цифры соответствуют номерам экспериментов. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

в вакууме ($P = 0$ Па): $V_{\max} = \sqrt{2C_p T} = 749$ м/с. Исходя из этого для максимальной вкладываемой мощности ($N = 240$ Вт) можно вычислить максимально возможную реактивную тягу, создаваемую устройством $F_{\max} = GV_{\max} = 8.8 \cdot 10^{-2} N = 10.3$ г.

Течение в этом случае является дозвуковым, плотность пара равна $\rho = P/(RT) = 1.7 \cdot 10^{-2}$ кг/м³. При этом скорость истечения пара из сопла вычисляется как $V = G/(\rho S) = 53.8$ м/с, что соответствует реактивной тяге $F = GV = 0.74$ г. Для мощности нагрева 41, 81 и 205 Вт реактивная тяга равна 0.022, 0.085 и 0.542 г.

Поскольку ввиду параметров измерительного оборудования проблематично измерить реактивную тягу при мощности нагрева 41 и 81 Вт, был проведен эксперимент по измерению реактивной тяги при мощности нагрева 240 Вт. Чтобы исключить действие электромагнитной силы, металл располагался по центру индуктора. С целью оценки нескомпенсированной электромагнитной силы, возникающей из-за вытягивания вверх расплавленного металла, был проведен численный расчет. Получено, что при изменении высоты тела на 3 мм (с сохранением объема) электромагнитная сила, направленная вверх, составляет ~ 2 мН (0.2 г), и эта сила уменьшает показания весов. При нагреве цинкового образца до температуры кипения начиналось интенсивное испарение (наблюдаемое через прозрачную крышку), на весах наблюдалось увеличение веса, что можно интерпретировать как появление реактивной тяги (при этом истинная тяга несколько больше измеренной, поскольку электромагнитная сила направлена в противоположную сторону). На рис. 3 показана зависимость тяги F от времени t .

Среднее значение тяги за рассматриваемый интервал времени составляет ~ 0.45 г, а максимальное 0.9 г, что

вполне согласуется с аналитической оценкой. Часть испарившегося цинка оседает на стенках сопла, уменьшение массы цинка за время эксперимента составило 0.22–0.54 г.

На примере цинка показана работоспособность концепции испарительного двигателя с нагревом рабочего тела индукционным методом. Космический мусор состоит преимущественно из алюминия или стали, для испарения этих материалов при достижимых температурах нужно более низкое давление (рис. 1). В космосе это условие выполняется без всяких проблем. Для примера на высоте МКС (400 км) давление составляет $\sim 9 \cdot 10^{-7}$ Па. Таким образом, для алюминия нужна температура менее 1000 К, а для стали — порядка 1000 К.

Благодарности

Авторы выражают благодарность П.И. Полякову и С.М. Юдину за помощь в подготовке статьи.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00911.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *ESA's Space Environment Report 2023* [Электронный ресурс]. https://www.esa.int/Space_Safety/ESA_s_Space_Environment_Report_2023
- [2] J. Morin, *Nature*, **567**, 25 (2019). DOI: 10.1038/d41586-019-00732-7
- [3] S.Y. Su, *Adv. Space Res.*, **10**, 389 (1990). DOI: 10.1016/0273-1177(90)90375-A.
- [4] J.N. Opiela, *Adv. Space Res.*, **43**, 1058 (2009). DOI: 10.1016/j.asr.2008.12.013
- [5] M. Emanuelli, G. Federico, J. Loughman, D. Prasad, T. Chow, M. Rathnasabapathy, *Acta Astron.*, **104**, 197 (2014). DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.07.035
- [6] V.V. Glazkov, O.A. Sinkevich, G.B. Shmelkov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1370**, 012036 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1370/1/012036
- [7] D.A. Vinogradov, V.V. Glazkov, Yu.P. Ivochkin, K.G. Kubrikov, I.O. Teplyakov, O.A. Sinkevich, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2057**, 012056 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2057/1/012056
- [8] S. Zinn, S.L. Semiatin, *Elements of induction heating: design, control and applications* (ASM International, USA, 1988).
- [9] В.Е. Зиновьев, *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник* (Металлургия, М., 1989).
- [10] Г.В. Самсонов, А.П. Эпик, *Тугоплавкие покрытия* (Металлургия, М., 1973).