

# ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ НАНОСПУТНИКА С БЕЗОПАСНЫМ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ

А.Н. Соборницкая, А.В. Ивлиев, А.А. Кумарин

Самарский университет, Самара, Россия

**Обоснование.** Одними из наиболее популярных спутников нанокласса являются спутники формата CubeSat 1U–3U. Для управления движения их центра масс требуется двигательная установка (ДУ). Для ДУ в данной работе были применены следующие требования:

- запас характеристической скорости не менее 50 м/с;
- изменение скорости полета за один этап коррекции — порядка 0,1 м/с;
- масса ДУ не более 2 кг, размеры не более 1,5U;
- безопасность для персонала на всем протяжении жизненного цикла.

**Цель** — разработать прототип летного варианта двигательной установки для аппарата формата CubeSat 3U, которой будет безопасен для использования персоналом и обучающимися на всех этапах разработки, изготовления и тестирования.

**Методы.** Для настоящего исследования был выбран такой тип ДУ, как электротермическая ДУ (ЭТДУ) [1–4]. Эта установка должна работать в импульсном режиме, с рабочим телом (РТ) — смеси воды дистиллированной с добавкой, для незамерзаемости, 40 % по массе спирта этилового. Такая добавка позволяет обеспечивать работоспособность вытеснительной системы подачи РТ вплоть до температуры  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Структурная схема ЭТДУ приведена на рис. 1.

РТ в баке с вытеснительной подачей, при открытии отсечного клапана по команде системы управления двигателем, поступает в нагреватель, где вначале нагревается до температуры кипения и испаряется. Затем перегревается до возможно большей температуры в том же нагревателе и истекает из сопла Лавала, создавая тягу. Система управления реализует необходимую циклограмму работы ЭТДУ.

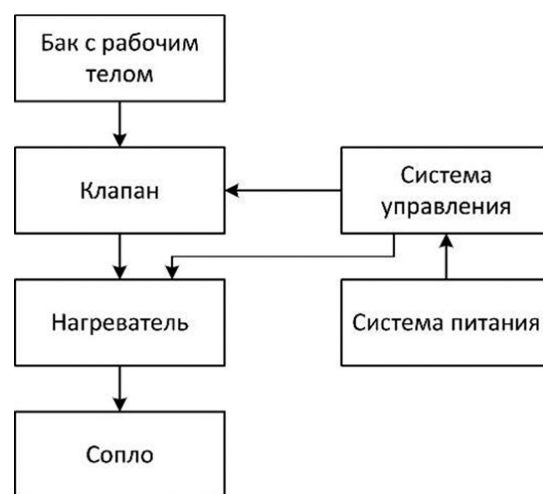


Рис. 1. Выбранная структурная схема электротермического двигателя

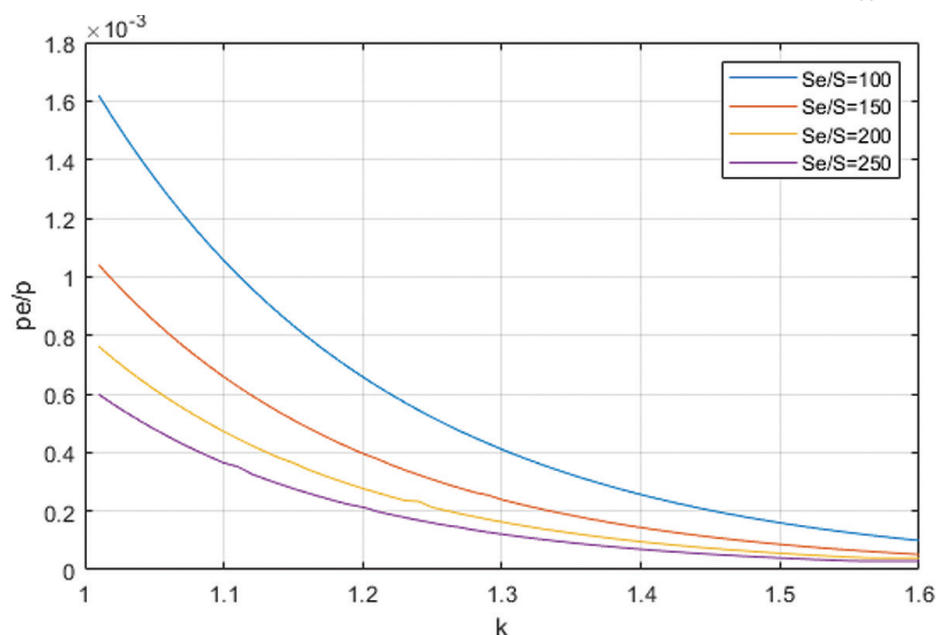


Рис. 2. Результаты определения отношения давлений  $p_e/p$  от показателя адиабаты

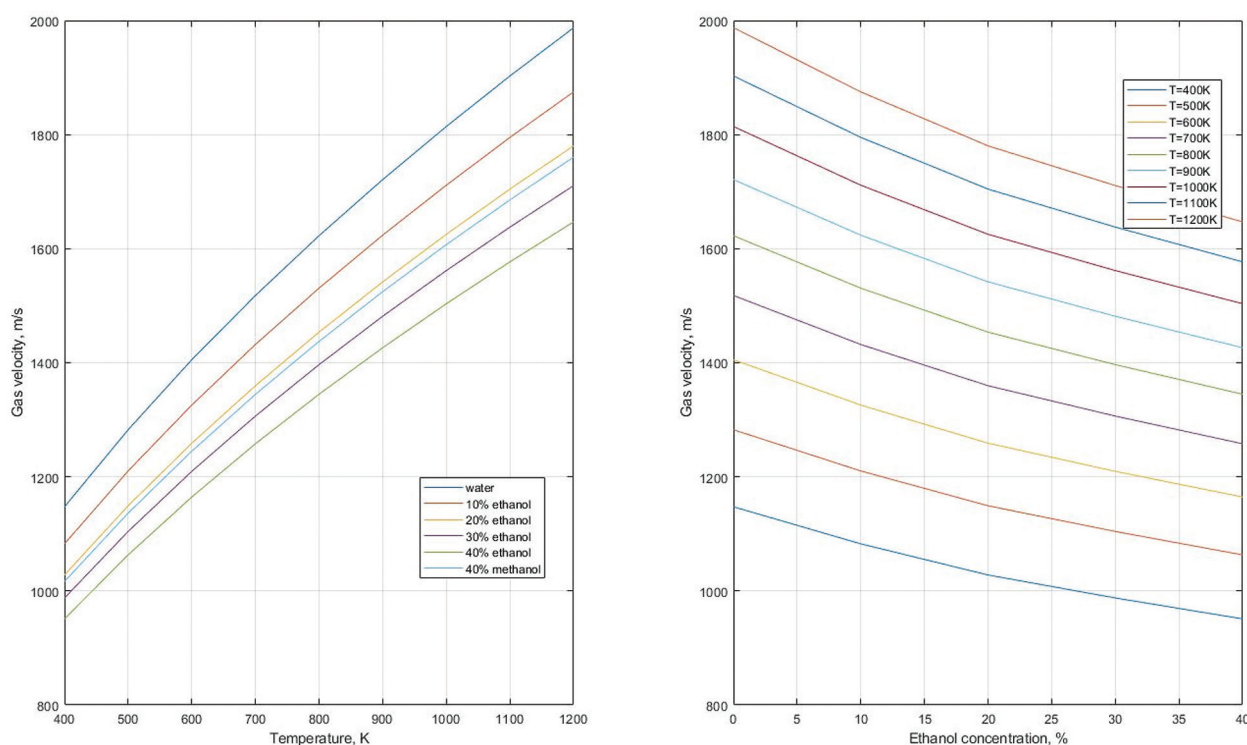


Рис. 3. Зависимости удельной тяги, в м/с, при работе ЭТДУ на РТ дистиллированная вода с добавками спирта этилового. Геометрическая степень расширения газа в сопле 100

Рассчитаем характеристики сопла Лавала по известным формулам. В начале найдем численным методом бисекции отношение абсолютных давлений на выходе из сопла и входе в него,  $p_e/p$ , которое зависит только от степени расширения газа в сопле, затем характеристики удельной тяги.

Полученная зависимость  $p_e/p$  от показателя адиабаты методом бисекции приведена на рисунке 2.

При выборе воды придется предусмотреть термостат, обеспечивающий работоспособность системы подачи РТ при температурах ниже точки замерзания воды. Термостат будет потреблять электроэнергию, иметь дополнительную массу и снижать надежность работы ЭТДУ, что сводит на нет преимущества воды как рабочего тела. Поэтому и был выбран метод обеспечения незамерзаемости воды путем добавки спирта.

Результаты расчета [4] характеристик ЭТДУ можно увидеть на рисунке 3.

Метиловый спирт позволяет обеспечить уровни удельной тяги и запаса характеристической скорости выше, чем при применении этилового спирта. Однако метиловый спирт представляет опасность химического отравления персонала при проведении испытаний, а также экипажа МКС в случае запуска космонавтами с ее борта, что неприемлемо. В изложенной связи для обеспечения незамерзаемости воды и были выбраны указанные выше добавки спирта этилового, который обеспечивает практическую безопасность РТ.

**Результаты.** Проведенные испытания показали удельную тягу ЭТДУ, равную 1320 м/с, запас характеристической скорости 62 м/с, при емкости бака РТ 0,17 кг. Масса ЭТДУ 1,6 кг, размеры 1,5U.

**Выводы.** 1. Прототип ЭТДУ спроектирован и изготовлен.

2. Разработана, изготовлена, снабжена математическим обеспечением экспериментальная установка, а также выполнен цикл испытаний прототипа ЭТДУ в рамках научно-исследовательской отработки.

3. Прототип ЭТДУ пригоден для образовательных и научных миссий, безопасен при проведении наземных испытаний, транспортировке, хранении, запуске с МКС и других носителей, полете по орбите.

4. Прототип ЭТДУ обеспечивает заданные характеристики [4].

**Ключевые слова:** Наноспутник; импульсная электротермическая двигательная установка; рабочее тело; электрический подогрев; суперконденсаторы; измерение тяги; автоматизированная система

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

## Список литературы

1. O'Reilly D., Herdrich G., Kavanagh D.F. Electric Propulsion Methods for Small Satellites: A Review // Aerospace. 2021. Vol. 8, No. 1. P. 22. DOI: 10.3390/aerospace8010022
2. Белоконов И.В., Ивлиев А.В., Богатырев А.М., и др. Выбор проектного облика двигательной установки наноспутника // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 3. С. 29–37.
3. Belokonov I., Ivliev A. Development of a propulsion system for a maneuvering module of a low-orbit nanosatellite // Procedia Engineering. 2017. Vol. 185. P. 366–372. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.317
4. Kumarin A.A., Kudryavtsev I.A. Modelling the EDLC-based Power Supply Module for a Maneuvering System of a Nanosatellite // IOP Conf Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 302, No. 1. P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012044

---

### *Сведения об авторах:*

**Александра Николаевна Соборницкая** — студентка, группа 6362-110301D, институт информатики и кибернетики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: altSobor@yandex.ru

**Алексей Андреевич Кумарин** — аспирант, группа А303, институт информатики и кибернетики; Самарский национальный исследовательский университет, Самара имени академика С.П. Королева, Россия. E-mail: alku\_samara@mail.ru

**Александр Владимирович Ивлиев** — кандидат технических наук, доцент, кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности, доцент, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Межвузовская кафедра космических исследований, доцент, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: ivlievav@mail.ru