

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ СКОРОСТИ ЗАПРАВКИ КСЕНОНОМ БАКА МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Угланов Д.А., Благин Е.В., Корнеев С.С., Марахова Е.А.
Самарский университет, г. Самара, skorneev1993@mail.ru

Ключевые слова: агрегат заправки ксенона, температура, скорость заправки.

Одним из главных направлений развития космической техники является применение в составе малых космических аппаратов ионных двигателей. В качестве рабочего тела для данных типов двигателей применяется ксенон. Со стороны двигательной установки к ксенону предъявляются особые требования по качеству и чистоте [1]. Газ не должен содержать различные механические примеси и сторонние газы в соответствии с ГОСТ 10219-77 «Ксенон. Технические условия». Также одним из требований со стороны малого космического аппарата при заправке ксенона является не превышение заданной температуры газа T_k , подаваемого в бак.

В соответствии с вышесказанным при проектировании агрегата заправки ксенона был произведен расчет допустимой скорости заправки для определения максимального расхода ксенона G , при котором его температура при попадании в бак не превышает заданную. Связано это с тем, что при осуществлении процесса втекания газа в емкость его температура будет расти [2]. Согласно ТЗ на разработку агрегата заправки ксенона в заправляемое изделие необходимо закачать рабочее тело со следующими параметрами: давление – не более $p=18,6$ МПа, температура – не более $T=313$ К. В заправляемый бак МКА объемом $V=10$ л необходимо заправить $m=(19,4\pm 0,15)$ кг ксенона.

Схематично процесс заправки ксеноном баков малого космического аппарата изображен на рис. 1. Агрегат заправки ксенона осуществляет перекачку газа из транспортировочного баллона в бак заправляемого изделия.



Рисунок 1 – Заправка МКА ксеноном

В основе решения данной задачи лежит первое начало термодинамики для открытой термодинамической системы:

$$Q + \Delta I = \Delta U + L \quad (1)$$

где Q – количество тепла, Дж;

ΔI – изменение энтальпии, Дж;

ΔU – изменение внутренней энергии, Дж;

Процесс заправки ксеноном бака не является адиабатным, так как бак не теплоизолирован и заправка осуществляется длительное время. Поэтому при определении температуры газа необходимо также учитывать теплообмен между баком и окружающей средой. Совершаемая работа L равна нулю, так как процесс заправки происходит при постоянном объеме.

Раскрывая выражение (1) получаем:

$$k \cdot F \cdot (T_{окр} - T_{нач}) + C_p \cdot T_{вх} \cdot G \cdot \Delta\tau = (m + G \cdot \Delta\tau) \cdot T_{к} \cdot C_v - m \cdot C_v \cdot T_{нач} \quad (2)$$

где k – коэффициент теплопередачи от ксенона к окружающей среде, Вт/(м²·К);

F – площадь поверхности бака, м²;

$T_{окр}$ – температура окружающей среды, К;

$T_{нач}$ – начальная температура ксенона в баке в заданный момент времени, К;

C_p и C_v – изобарная и изохорная теплоемкости ксенона, Дж/(кг·К);

$\Delta\tau$ – временной шаг расчета, с;

$T_{вх}$ – температура входящего ксенона, К.

Выразив из выражения (2) конечную температуру ксенона в баке получаем:

$$T_{к} = \frac{k \cdot F \cdot (T_{окр} - T_{нач}) + C_p \cdot T_{вх} \cdot G \cdot \Delta\tau + m \cdot C_v \cdot T_{нач}}{(m + G \cdot \Delta\tau) \cdot C_v} \quad (3)$$

Отличительной особенностью ксенона как рабочего тела является значительное изменение его плотности в надкритической области при незначительном изменении давления. Поэтому для расчета давления газа в баллоне использование уравнений идеального газа приведет к значительной погрешности. Так как изменение температуры в процессе относительно невелико, расчет давления можно осуществить через массу ксенона в резервуаре при помощи функциональной зависимости (4):

$$p = 7.92 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{m}{V}\right)^3 - 21949.78 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{m}{V}\right)^2 + 0.02213155407 \cdot \left(\frac{m}{V}\right) - 0.23991722318 \quad (4)$$

Решая полученные выражения (3) и (4) были получены графики изменения температуры и давления газа от времени заправки (рис. 2).

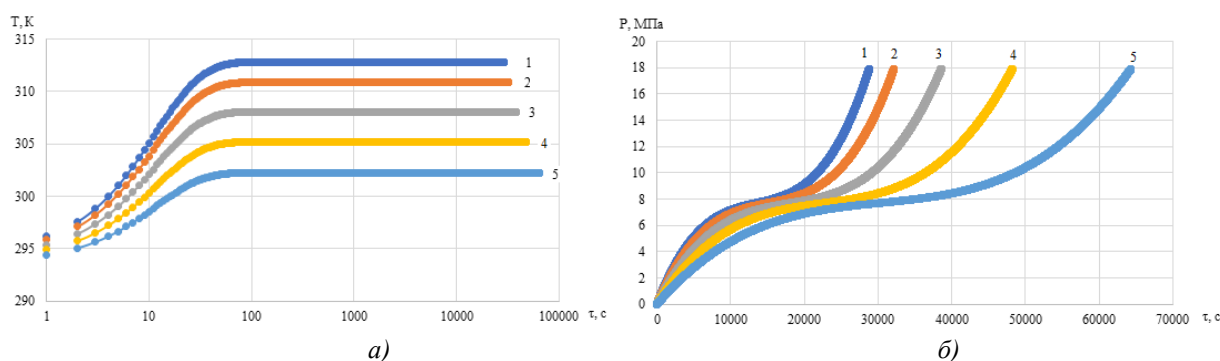


Рисунок 2 – Графики зависимости температуры (а) и давления (б) ксенона от времени заправки
 1 – $G=0.67$ г/с, 2 – $G=0.6$ г/с, 3 – $G=0.5$ г/с, 4 – $G=0.4$ г/с, 5 – $G=0.3$ г/с

В соответствии с проведенными расчетами был определен расход ксенона при заправке бака МКА при заданных параметрах. Максимально допустимый расход ксенона составляет 0,67 г/с, при этом максимально достигаемая температура газа составляет 312,8 К. Основное изменение температуры ксенона при заправке происходит на начальном этапе заправки в течение первых трех минут, затем температура стабилизируется. Время заправки также составит 8 часов.

Результаты работы получены с использованием оборудования центра коллективного пользования «МЕЖКАФЕДРАЛЬНЫЙ УЧЕБНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР САМ-ТЕХНОЛОГИЙ» при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 0777-2020-0019).

Список литературы

1. Техническая термодинамика / В.А. Кирилин, В.В. Сычев, А.Е. Щейндлин. М.: Энергия, 1983. 496 с.

2. Современные проблемы создания агрегатов заправки ксенона для малых космических аппаратов // Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова, посвященный 110-летию ПАО "ОДК-Кузнецов". 2022. С. 67-68.

Сведения об авторах

Угланов Дмитрий Александрович, доцент кафедры ТиТД, ведущий научный сотрудник НОЦ ГДИ - 209. Область научных интересов: холодильная и криогенная техника.

Благин Евгений Валерьевич, старший преподаватель кафедры ТиТД, научный сотрудник НОЦ ГДИ - 209. Область научных интересов: разработка математических моделей процессов гидродинамики и теплообмена в криогенных установках, исследование нестационарных процессов теплообмена в аппаратах микрокриогенных газовых машин.

Корнеев Сергей Сергеевич, ассистент кафедры ТиТД, младший научный сотрудник НОЦ ГДИ-209. Область научных интересов: рабочий процесс ДВС.

Марахова Елизавета Андреевна, аспирант кафедры ТиТД, инженер НОЦ ГДИ-209. Область научных интересов: разработка математических моделей процессов гидродинамики и теплообмена в криогенных установках, исследование нестационарных процессов теплообмена в аппаратах микрокриогенных газовых машин.

DETERMINATION OF THE PERMISSIBLE REFUELING SPEED XENON TANK OF A SMALL SPACECRAFT

Ugланov D.A., Bлагин E.V., Корнеев S.S., Марахова E.A.
Samara National Research University, Samara, Russia, skorneev1993@mail.ru

Keywords: xenon refueling unit, temperature, refueling speed.

This article describes the calculation of the xenon refueling rate of a small spacecraft tank. During the calculation, the values of xenon consumption were obtained, at which the temperature of xenon in the refueled tank does not exceed the set value.