

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО СВЧ-ЭЛЕМЕНТА В ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКОМ КЛАПАНЕ-ИСПАРИТЕЛЕ МИКРОДВИГАТЕЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И. С. Вавилов, А. И. Лукьянчик, П. С. Ячменев,  
Р. Н. Литая, А. В. Лысаков

Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Статья посвящена экспериментальной обработке и теоретическому исследованию способа охлаждения кристалла СВЧ-транзистора корректирующего микродвигателя малого космического (МКА). Отличительная особенность предложенного способа заключается в полезном использовании отводимого от СВЧ-транзистора тепла в дилатометрическом клапане-испарителе.

В целом, данная работа является продолжением работ по созданию методологических основ для проектирования корректирующего двигателя микротяги МКА с СВЧ-нагревом рабочего тела. В данной статье речь идет об охлаждении СВЧ-транзистора в условиях вакуума с применением отведенной энергии в дилатометрическом клапане и для предварительного нагрева рабочего тела перед входом в камеру СВЧ.

**Ключевые слова:** малый космический аппарат, воздух, тяга, расход, СВЧ, стержень, газод.

## Введение

Неоднократно отмечалось, например, в предыдущей работе авторов этой статьи [1], что проектирование двигателей малой тяги сверхмалых космических аппаратов (СМКА) сопряжено с большим количеством ограничений, фундаментом которых являются:

- низкая энергетика СМКА;
- малые масса и габариты СМКА;
- возможности системы управления ориентацией.

В связи с этим актуальным для микродвигателей СМКА является внедрение при их разработке концепции «швейцарского ножа», когда один конструктивный элемент выполняет более одной функции в процессе «жизнедеятельности» двигательной установки (ДУ). Применение этой концепции позволяет уменьшить номенклатуру элементов ДУ, что непосредственно приведёт к уменьшению массы, габаритов и энергопотребления. Здесь же возникает вопрос о полезном использовании диссипативной энергии, которая, в общем случае, безвозвратно уходит в окружающее пространство. Использование диссипативной энергии позволяет повысить общий КПД ДУ.

В электротермическом микродвигателе (ЭТМД) с СВЧ-нагревом рабочего тела диссипативной энергией является тепловой поток, возникающий в твердотельном СВЧ-генераторе при его нормальной работе.

К твердотельным СВЧ-генераторам относятся СВЧ-транзисторы, для нормальной работы которых требуется конвективное охлаждение. Такие приборы обычно устанавливаются на массивные металлические пластины, обеспечивающие отвод тепла на внешний корпус или окружающему пространству конвекцией и излучением. Например, работа мощных LDMOS-транзисторов может разогреть сопутствующую аппаратуру до 60 °С [2].

Рабочая температура кристалла транзистора имеет большое влияние на выходную мощность, как следствие, и КПД прибора. Набирающие популярность карбид-кремниевые СВЧ-транзисторы могут обеспечивать заданные технические характеристики при температуре кристалла до 255 °С [3].

Данные о температурах приведены при исследовании «на воздухе», когда конвективный теплообмен обеспечивает значительный теплоём с корпуса транзистора. В условиях вакуума температура корпуса, как показали экспериментальные исследования, может быть выше на 100–120 °С.

КПД СВЧ-транзисторов в настоящее время находится в диапазоне 40–70%. Например, мощный генераторный СВЧ-транзистор КТ9197Б с выходной мощностью 5 Вт имеет КПД 55% [4], диссипативные потери энергии составляют 4 Вт. Когда речь идёт о мощных ДУ (с энергопотреблением 60–100 Вт) для крупных МКА этими величинами можно пренебречь, но в СМКА на работу ДУ без ущерба для основных систем можно выделить максимум 5–7 Вт. В этом случае необходимо максимально использовать все энергетические возможности аппарата и минимизировать утечки.

## Постановка задачи

Для реализации концепции «швейцарского ножа» в ЭТМД СМКА был предложен, изготовлен и исследован силовой орган дроссельного клапана, выполненный в виде стержневого радиатора с внутренним газодом (рис. 1).

Посредством графитовых нагревательных элементов (ГТЭН), установленных в каналы пластины-основания, создавался тепловой поток такой величины, что термопара, установленная в пластине, фиксировала величину равновесной температуры 250 °С при испытаниях «на воздухе» без установки стержневого радиатора. Т.о., определялась электри-

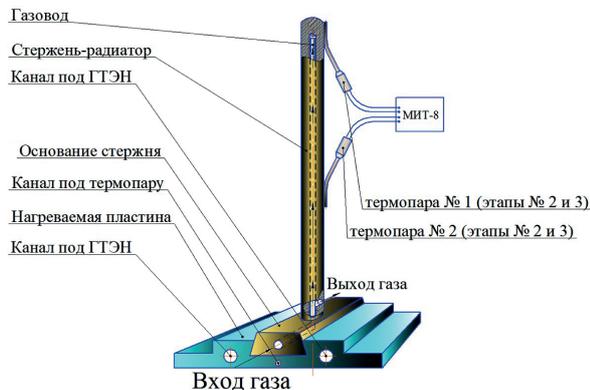


Рис. 1. Экспериментальный образец стержневого радиатора с внутренним газоводом  
Fig. 1. Experimental sample of a rod radiator with an internal gas conduit

ческая мощность, необходимая для имитации тепловых эффектов, возникающих при работе карбидкремниевого СВЧ-транзистора. Основание стержня и стержень-радиатор представляют собой неразборный элемент, в основании имеется газовод, переходящий в газовод стержня. При движении газ проходил двойной путь: от входа по капиллярной трубе до тушиковой области и обратно по кольцевому зазору к основанию стержня и выходу в окружающее пространство. Основание стержня фиксировалось на нагреваемой пластине с помощью замка «ласточкин хвост».

Составные части и необходимые для теоретического анализа характеристики материалов экспериментального образца приведены в табл. 1.

Экспериментальное исследование было разбито на несколько взаимосвязанных этапов:

этап №1: исследование теплообмена нагреваемой пластины в вакууме;

этап №2: исследование теплообмена нагреваемой пластины с установленным стержневым радиатором в вакууме;

этап №3: исследование теплообмена нагреваемой пластины с установленным стержневым радиатором и течением газа по газоводу в вакууме.

### Теория

На этапе №1 нагреваемая пластина помещалась в вакуумную камеру, тепловой поток мощностью 19,4 Вт подводился к пластине от ГТЭН, температура пластины измерялась тремя термопарами, одна из которых (термопара №3 на рис 1 и 2) располагалась внутри пластины, остальные располагались на поверхности пластины. На рис.2 показана зависимость температуры пластины от времени нагрева, построенная по результатам эксперимента. Видно, что равновесная температура пластины принимает значение 288 °С.

Целью теоретического исследования на этапе №1 являлась верификация уравнения баланса мощностей, которое для системы «ГТЭН-пластина» выглядит следующим образом:

$$P_{эл} = P_{изл.ГТЭН1} + P_{изл.ГТЭН2} + P_{изл.Пл1} \quad (1)$$

где  $P_{эл} = 19,4 \text{ Вт}$  — приборная электрическая мощность, подводимая к пластине от ГТЭН;  $P_{изл.ГТЭН1}$  и  $P_{изл.ГТЭН2}$  — соответственно мощность, излучаемая

выступающими участками ГТЭН и потери мощности на участках ГТЭН в каналах нагреваемой пластины;  $P_{изл.Пл}$  — мощность, излучаемая поверхностью пластины в окружающее пространство.

Тепловой поток, излучаемый выступающими поверхностями ГТЭН можно выразить по закону Стефана – Больцмана [5]:

$$P_{изл.ГТЭН1} = \sigma \cdot T_{ГТЭН}^4 \cdot \varepsilon_{Al_2O_3} \cdot F_{выст}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана – Больцмана;  $\varepsilon_{Al_2O_3}$  — степень черноты корпуса ГТЭН (значение определено по [6] и приведено в табл.1);  $T_{ГТЭН}$  — температура керамической поверхности ГТЭН, которая определяется по уравнению баланса мощности для стационарного теплового режима, когда вся подводимая электрическая мощность идёт на радиационное излучение с керамической поверхности ГТЭН общей площадью  $F_{ГТЭН}$ :

$$P_{эл} = \sigma \cdot T_{ГТЭН}^4 \cdot \varepsilon_{Al_2O_3} \cdot F_{ГТЭН}. \quad (3)$$

Величина потерь при передаче излучением от керамической поверхности ГТЭН внутренней цилиндрической поверхности каналов пластины определяется как разность между подведённым тепловым потоком и тепловым потоком, поглощённым пластиной [7]:

$$P_{изл.ГТЭН2} = \sigma \cdot (T_{ГТЭН}^4 - T_{Пл}^4) \cdot \varepsilon_{пр} \cdot F_{ГТЭН.Пл}, \quad (4)$$

где  $T_{Пл}$  — температура нагреваемой пластины;

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{Al_2O_3}} + \frac{F_{ГТЭН.Пл}}{F_{кан.Пл}} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_{Al}} - 1 \right)}$$
 — приведённая

степень черноты системы тел [7];  $F_{ГТЭН.Пл}$  — площадь излучающей поверхности ГТЭН, охватываемая внутренней цилиндрической поверхностью канала пластины  $F_{кан.Пл}$ ;  $\varepsilon_{Al}$  — степень черноты материала пластины (значение определено по [8] и приведено в табл. 1).

Тепловое излучение, отдаваемое всей поверхностью нагреваемой пластины  $F_{Пл}$  окружающему пространству, определяется по закону Стефана – Больцмана:

$$P_{изл.Пл} = \sigma \cdot T_{Пл}^4 \cdot \varepsilon_{Al} \cdot F_{Пл}. \quad (5)$$

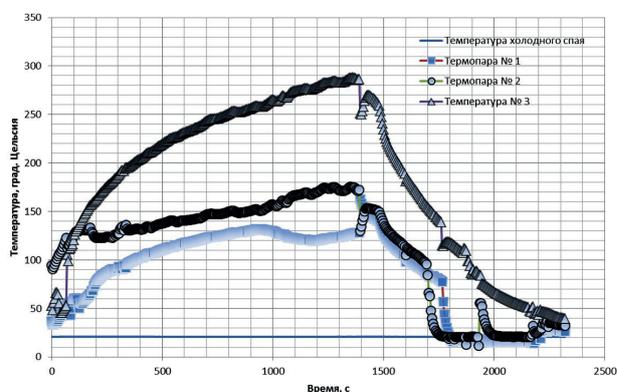


Рис. 2. Результаты эксперимента по теплообмену пластины в вакууме  
Fig. 2. Results of the experiment on plate heat transfer in vacuum

Таблица 1. Элементы экспериментального образца и свойства материалов  
Table 1. Elements of the experimental sample and the properties of materials

Наименование/ изображение/материал	Характерные размеры, мм	Степень черноты, $\epsilon$	Коэффициент теплопроводности, $\lambda$ , Вт/(м·К)
<p>Нагреваемая пластина</p>  <p>Алюминий</p>	64×33,5×6	0,33	220
<p>Стержень-радиатор</p>  <p>Дюралюминий</p>	<p>Внешняя поверхность Ø10×100</p> <p>Канал Ø2,5×95</p>	<p>Боковая поверхность 0,045</p> <p>Торец 0,03</p>	155
<p>Основание стержня</p>  <p>Алюминий</p>	13×33,5×5	0,33	220
<p>ГТЭН</p>  <p>Корунд, графит</p>	Ø3×35	0,7	3,34

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований и теоретического анализа  
Table 2. Results of experimental studies and theoretical analysis

Показатель	Экспериментальное значение	Расчётное значение
Равновесная температура нагреваемой пластины на этапе № 1, $T_{пл}$ , К /°С	561/288	572,507/299,507
Равновесная температура горячего конца стержня на этапе № 2, $T_{н.ст}$ , К /°С	—	380,05/107,052
Тепловой поток, отводимый стержнем-радиатором на этапе № 2, $P_{изл.ст}/ P_{гизл.ст}$ , Вт	—	7,007/6,481
Температура середины стержня на этапе № 2, °С	86,41	106,71
Температура конца стержня на этапе № 2, °С	105,63	106,5
Равновесная температура горячего конца стержня на этапе № 3, $T_{н.ст3}$ , К /°С	—	377,69/104,69
Тепловой поток, отводимый стержнем-радиатором на этапе № 3, $P_{изл.ст3}$ , Вт	—	5,613
Тепловой поток, отводимый воздухом на этапе № 3, $P_{газ}$ , Вт	—	1,394/0,868
Температура воздуха на выходе из газоведа стержня на этапе № 3, К	—	1835,118/1285,76
Скорость молекул азота воздуха, $v$ , м/с	—	1278/1070
Тяга экспериментального образца как ЭТМД, $R_{ЭТМД}$ , мН	—	1,336/1,118

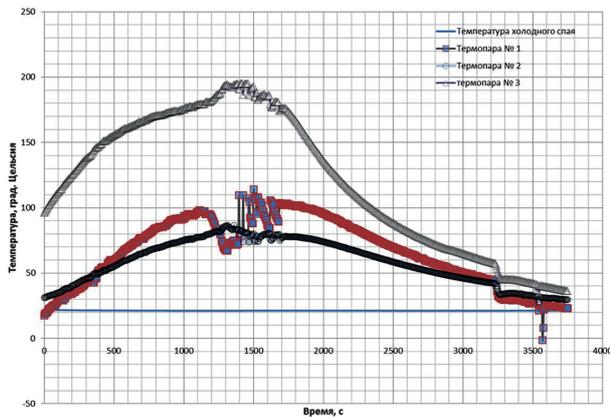


Рис. 3. Результаты эксперимента по теплообмену пластины со стержнем в вакууме  
Fig. 3. Results of the experiment on the heat transfer of a plate with a rod in a vacuum

Решая уравнения (1) – (5), была получена искомая теоретическая температура нагрева пластины  $T_{пл}$ . Экспериментальные и полученные расчётные значения приведены в табл. 2.

На этапе №2 нагреваемая пластина со стержневым радиатором помещались в вакуумную камеру. Тепловой поток мощностью 19,4Вт подводился к пластине от ГТЭН, температура пластины измерялась термопарой, температура стержня замерялась в срединной точке (термопара №2, рис. 1) и в верхней точке (термопара №1, рис. 1).

На рис.3 показана зависимость температуры пластины от времени нагрева, построенная по результатам эксперимента. Видно, что равновесная температура пластины принимает значение 195°C.

Целью теоретического исследования на этапе №2 являлось определение количества теплоты, отдаваемое стержнем в окружающее пространство в виде излучения.

Количество теплоты, передаваемое всей поверхностью стержня  $F_{ст}$  конечной длины  $L_{ст}$  и диаметра  $D_{ст}$  при нагреве с одной стороны до температуры  $T_{н.ст}$  можно определить, используя формулу [9]:

$$P_{изл.ст} = \lambda_{да} \cdot m \cdot F_{ст} \cdot T_{н.ст} \cdot \frac{\frac{\alpha_{т}}{m \cdot \lambda_{да}} + thm \cdot L_{ст}}{1 + \frac{\alpha_{т}}{m \cdot \lambda_{да}} + thm \cdot L_{ст}}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{да}$  — коэффициент теплопроводности дюралюминия (значение определено по [10] и приведено в табл. 1);

$m = 2 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{б}}{\lambda_{да} \cdot D_{ст}}}$  — коэффициент, принятый для

круглого стержня;  $\alpha_{б}$  и  $\alpha_{т}$  — соответственно коэффициенты теплоотдачи боковой поверхности стержня и его торца (эти величины отличаются друг от друга, т. к. на поверхности стержня имеется гальваническое покрытие, а торец токарно обработан). Коэффициенты теплоотдачи в случае радиационного теплообмена зависят от температуры тела и степени черноты поверхности (значения степеней черноты определены по [11] и приведены в табл. 1).

С другой стороны, тепловой поток, излучаемый стержнем, является частью тепла, переданного от нагреваемой пластины основанию стержня при прямом контакте поверхностей в замке «ласточкин

хвост». Т. о., эту же величину  $P_{изл.ст}$  можно выразить через теплопередачу между двумя плоскими стенками при учёте теплоотдачи энергии в вакуум [9]:

$$P_{изл.ст} = \frac{T_{пл.экс} - T_{н.ст}}{\frac{\delta}{\lambda_{Al}} + \frac{T_{н.ст} \cdot F_{ос.ст}}{P_{изл.ст} - \varepsilon_{Al} \cdot \sigma \cdot T_{н.ст}^4 \cdot F_{кон}}} \cdot F_{кон}, \quad (7)$$

где  $\lambda_{Al}$  — коэффициент теплопроводности алюминия (значение определено по [10] и приведено в табл. 1);  $\delta$  — толщина основания стержня;  $T_{пл.экс}$  — температура нагреваемой пластины по результатам эксперимента (195°C);  $F_{ос.ст}$  — площадь стержня в месте контакта с основанием;  $F_{ос}$  — площадь поверхности излучения основания стержня не затенённая его торцевой поверхностью;  $F_{кон}$  — площадь контакта основания стержня с нагреваемой пластиной.

Совместное решение уравнений (6) и (7) даёт значение температуры  $T_{н.ст}$  (табл. 2). По уравнению (6) получаем мощность излучения стержня  $P_{изл.ст}$  (табл. 2).

Величину  $P_{изл.ст}$  можно определить другим способом, если рассматривать мощность излучения стержневого радиатора как разность между подводимым от ГТЭН тепловым потоком и мощностью излучения свободной поверхности пластины (площадь всей нагреваемой пластины минус площадь, закрытая основанием стержня):

$$P'_{изл.ст} = P_{эл} - P_{изл.пл2}. \quad (8)$$

Здесь  $P_{изл.пл2}$  определяется по формулам (1) – (5) с учётом новой экспериментальной температуры  $T_{пл.экс}$  и уменьшенной на величину закрытой основанием пластины площади. Расчётное значение приведено в табл. 2.

Для верификации результатов расчёта необходимо построить эпюру распределения температуры по длине стержня и сравнить с экспериментальными значениями. Эпюру температуры можно построить, воспользовавшись формулой [9]:

$$T(x) = T_{н.ст} \cdot \frac{\left(1 - \frac{\alpha_{т}}{m \cdot \lambda_{да}}\right) \cdot e^{m \cdot x} \cdot e^{-m \cdot L_{ст}} + \left(1 + \frac{\alpha_{т}}{m \cdot \lambda_{да}}\right) \cdot e^{-m \cdot x} \cdot e^{-m \cdot L_{ст}}}{e^{m \cdot L_{ст}} + e^{-m \cdot L_{ст}} + \frac{\alpha_{т}}{m \cdot \lambda_{да}} \cdot (e^{m \cdot L_{ст}} - e^{-m \cdot L_{ст}})}. \quad (9)$$

Эпюра, построенная по формуле (9), представлена на рис. 4. Сравнение расчётных значений с экспериментальными данными представлено в табл. 2.

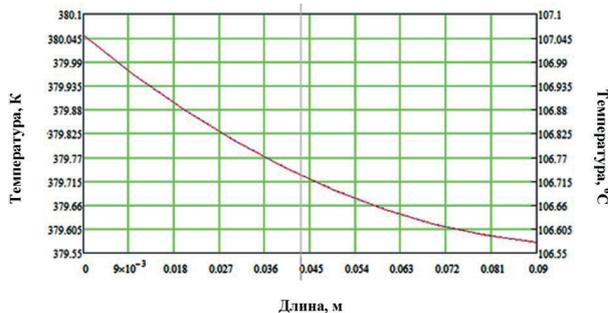


Рис. 4. Распределение температуры по длине стержня  
Fig. 4. Temperature distribution along the length of the rod

На этапе №3 нагреваемая пластина со стержневым радиатором помещались в вакуумную камеру, по внутреннему газоводу пускался газ (воздух) с объёмным расходом  $Q_{\text{возд}} = 6,007 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (определялся ротаметром РМ-А-0,063 ГУЗ) и давлением на входе в газовод  $p_{\text{возд}} = 14665 \text{ Па}$  (по манометру, установленному в вакуумной камере). Тепловой поток мощностью 19,4 Вт подводился к пластине от ГТЭН, температура пластины измерялась термопарой №3, температура стержня замерялась в срединной точке (термопара №2, рис. 1). На рис. 5 показана зависимость температуры пластины от времени нагрева, построенная по результатам эксперимента. Видно, что равновесная температура пластины принимает значение 173 °С.

Целью работ на этапе №3 является определение величины нагрева газа при течении во внутреннем газоводе.

Теплообмена между газом и разогретым телом описывается формулой Ньютона – Рихмана [9]:

$$P_{\text{ГАЗ}} = \alpha \cdot (T_{\text{ВОЗД}} - T_{\text{СТ}}) \cdot \pi \cdot D_{\text{ЭКВ}} \cdot L_{\text{ГАЗ}}, \quad (10)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от поверхности газовода воздуху;  $L_{\text{ГАЗ}}$  — длина газовода в стержне;  $T_{\text{ВОЗД}}$  — температура, до которой нагреется воздух при своём движении по газоводу;  $D_{\text{ЭКВ}}$  — эквивалентный диаметр газовода, равный учетверённой площади поперечного сечения газовода, делённой на его полный периметр [9].

Коэффициент  $\alpha$  определяется через число Нуссельта:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{ВОЗД}}}{L_{\text{ГАЗ}}}, \quad (11)$$

где  $\lambda_{\text{ВОЗД}}$  — коэффициент теплопроводности воздуха при давлении в газоводе.

Число Нуссельта определяется по эмпирической зависимости для определённого режима течения в газоводе. Для установления режима течения определяется число Рейнольдса:

$$Re = \frac{4 \cdot Q_{\text{ВОЗД}}}{\pi \cdot D_{\text{ЭКВ}} \cdot \eta_{\text{ВОЗД}}}, \quad (12)$$

где  $\eta_{\text{ВОЗД}}$  — динамическая вязкость воздуха при давлении в газоводе.

Динамическая вязкость разреженного многоатомного газа может быть найдена как функция эмпирических параметров [12]:

$$\eta_{\text{В}}(\eta_{\text{СТ}}) = 2,6693 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{M_{\text{ВОЗД}} \cdot T_{\text{В}}(T_{\text{СТ}})}{\sigma_{\text{А}}^2 \cdot \Omega_{\eta}}}, \quad (13)$$

где  $M_{\text{ВОЗД}}$  — молекулярная масса воздуха;  $T_{\text{В}}$  — температура воздуха (вычисляется для температуры газа на входе в газовод и по температуре стенки), К;  $\sigma_{\text{А}}$  — диаметр молекул, ангстрем;  $\Omega_{\eta}$  — медленно изменяющаяся функция безразмерной температуры [12].

Вычисление числа Re показало, что оно находится в диапазоне  $10 < Re < 1 \cdot 10^4$ .

Согласно [9] средний коэффициент теплоотдачи можно определить по формуле:

$$Nu = 1,4 \cdot \left( Re \cdot \frac{D_{\text{ЭКВ}}}{L_{\text{ЭКВ}}} \right)^{0,4} \cdot Pr_{\text{В}}^{0,33} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{В}}}{Pr_{\text{СТ}}} \right)^{0,25}, \quad (14)$$

где  $Pr_{\text{В}}(Pr_{\text{СТ}}) = \frac{\eta_{\text{В}}(\eta_{\text{СТ}}) \cdot c_{\text{Р,В}}(c_{\text{Р,СТ}})}{\lambda_{\text{В}}(\lambda_{\text{В,СТ}})}$  — числа Прандтля

по температуре газа на входе в газовод и при температуре внутренней стенки газовода.

Изобарная теплоёмкость воздуха при термодинамических параметрах в газоводе может быть выражена через теплоёмкость газа Ван-дер-Ваальса [13]:

$$c_{\text{Р,В}}(c_{\text{Р,СТ}}) = \left\{ \frac{R}{1 - \frac{2 \cdot a_{\text{ВОЗД}} \cdot \rho_{\text{ВОЗД}}}{T_{\text{В}}(T_{\text{СТ}}) \cdot R \cdot M_{\text{ВОЗД}}} \times \frac{1}{M_{\text{ВОЗД}} \left( 1 - \frac{b_{\text{ВОЗД}} \cdot \rho_{\text{ВОЗД}}}{M_{\text{ВОЗД}}} \right)^2 + \frac{5 \cdot R}{2}} \right\} \cdot \frac{1}{M_{\text{ВОЗД}}}, \quad (15)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $a_{\text{ВОЗД}}$  и  $b_{\text{ВОЗД}}$  — константы Ван-дер-Ваальса для воздуха;  $\rho_{\text{ВОЗД}}$  — плотность воздуха при давлении  $P_{\text{ВОЗД}}$  (определяется по уравнению Ван-дер-Ваальса);  $T_{\text{В}}$  и  $T_{\text{СТ}}$  — соответственно температура воздуха на входе в газовод и температура стенки газовода.

Теплопроводность разреженного воздуха можно оценить, используя зависимость [12]:

$$\lambda_{\text{В}}(\lambda_{\text{СТ}}) = 8,322 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{В}}(T_{\text{СТ}})}{\sigma_{\text{А}}^2 \cdot \Omega_{\lambda}}}, \quad (16)$$

где  $\Omega_{\lambda}$  — интеграл, численное значение которого рассчитывается в рамках модели потенциала межмолекулярного взаимодействия Леннарда – Джонса [12].

Для определения величины теплового потока, отобранной от стержня воздухом, при его движении по газоводу требуется определить величину теплового потока, отдаваемую стержнем окружающему пространству. Методика её определения описана на этапе №2. Совместное решение уравнений (6) и (7) при учёте того, что на этапе №3  $T_{\text{ПЛ,эк}} = 173 \text{ °С}$ , даёт значение температуры  $T_{\text{Н,СТ3}}$  (табл. 2). По уравнению (6) получаем мощность излучения стержня  $P_{\text{изл,СТ3}}$  при охлаждении его воздухом (табл. 2).

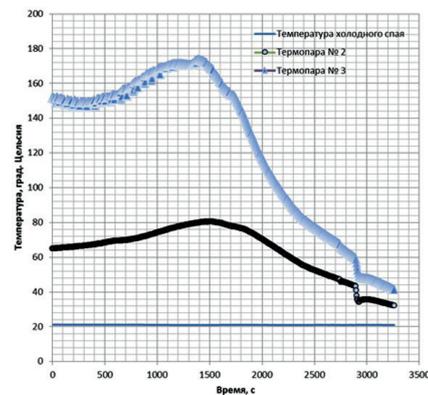


Рис. 5. Результаты эксперимента по теплообмену пластины со стержнем в вакууме при подаче газа (показан участок достижения равновесной температуры)  
Fig. 5. The results of the experiment on the heat transfer of a plate with a rod in a vacuum with the supply of gas (the region of attainment of the equilibrium temperature is shown)

Тепловой поток, отбираемый газом, можно получить как разность теплового потока стержня без газа с тепловым потоком стержня при течении воздуха по газоводу:

$$P_{\text{ГАЗ}} = P_{\text{изл.СТ}}(P'_{\text{изл.СТ}}) - P_{\text{изл.СТЗ}}. \quad (17)$$

Расчётные значения мощностей, идущих на нагрев газа, приведены в табл. 2.

Решая уравнения (10) – (17), получаем искомую температуру воздуха на выходе из газовода стержня (табл. 2).

Зная температуру газа, можно оценить скорость движения частиц на выходе из газовода. Для этого воспользуемся уравнением средней кинетической энергии движения молекул для одноатомного газа, которое, судя по экспериментальным данным, подходит и для многоатомного газа (расчёт ведётся для преобладающего в смеси компонента — азота) [14]:

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T_{\text{ВОЗД}}}{m_{N_2}}}, \quad (18)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $m_{N_2}$  — масса молекулы азота.

Расчётные значения скорости приведены в табл. 2.

Если рассматривать опытный образец как ЭТМД, результатом работы которого является создание реактивной тяги, то её можно определить по формуле:

$$P_{\text{ЭТМД}} = Q_{\text{ВОЗД}} \cdot P_{\text{ВОЗД}} \cdot v. \quad (18)$$

Результаты расчёта приведены в табл. 2.

Следует отметить, что полученная величина тяги соответствует требованиям системы управления ориентацией СМКА. При этом нагрев газа осуществлялся от стержня-радиатора, температура которого не превышала 110°C.

### Результаты экспериментов

В ходе решения задачи охлаждения СВЧ-транзистора микрорасходом рабочего газа были произведены три экспериментальных этапа исследований с теоретической обработкой каждого этапа. Результаты экспериментального исследования и теоретического анализа приведены в табл. 2. Данные о динамике нагрева элементов образца, полученные в ходе экспериментальных исследований представлены на рис. 2, 3 и 5.

### Обсуждение результатов

В ходе экспериментальных и теоретических работ были получены основные результаты, интересные для дальнейших исследований:

1. Была верифицирована математическая модель, описывающая тепловые процессы при течении малого объёма газа по газоводу нагревательного элемента, которая будет применена при проектировании нагревателя рабочего тела микродвигателя.

2. Экспериментально было получено значение количества теплоты, отбираемое газом при движении его в газоводе образца, которое позволяет сделать заключение о большой величине кинетической температуры газа на выходе из газовода и высоком значении удельного импульса тяги.

### Выводы и заключение

Из всего изложенного можно сделать следующие выводы:

1) касательно охлаждающей способности стержневого радиатора с газоводом можно отметить, что в случае массивных стержней с большой поверхностью излучения (как в описанном эксперименте) роль воздушного охлаждения невелика, т.к. газ отводит не более 1,5Вт тепловой энергии, когда подавалось 19,4Вт. Благодаря воздушному охлаждению условный кристалл СВЧ-транзистора был «холоднее» на 22°C, чем без него. При этом сам по себе стержневой радиатор охлаждал условный кристалл СВЧ-транзистора на 104°C. В случае малых поверхностей излучения и малых подводимых мощностей (до 7 – 10Вт) роль газа в охлаждении возрастает;

2) из первого пункта вытекает вывод о том, что стержневой радиатор с внутренним газоводом эффективно использовать как предварительный нагреватель рабочего тела микродвигателя, т.к. при малых расходах газа можно получить высокую степень нагрева газа и высокий удельный импульс тяги;

3) касательно дилатометрического эффекта и возможности использования стержня как толкателя дроссельного клапана можно сказать, что при температурах до 110°C использовать непосредственно материал стержня в дилатометрическом приводе не имеет смысла. Это связано с малым коэффициентом теплового удлинения металлов. Предлагается ввести в конструкцию промежуточный элемент в виде полимерной (эпоксидные смолы, эбонит, полиэтилен, фторопласт) трубки, коэффициент теплового удлинения которых в 10 – 15 раз выше, чем у металлов.

### Благодарности

Данные исследования проводятся в рамках финансовой поддержки Российским фондом фундаментальных исследований по Договору №31 16-38-60089\15 от 02.12.2015 г. (НИР № Гр.44-15, рег. № АААА-А161160202100195).

### Список источников

1. Вавилов И. С., Косицын В. В., Лукьянчик А. И. [и др.]. О возможности разложения аммиака СВЧ-воздействием в корректирующем микродвигателе малого космического аппарата // Омский научный вестник. 2016. № 6 (150). С. 58 – 63.
2. Кучерук В. В., Лебедев Н. В., Сорибекин А. М. Исследование зависимости выходных параметров от температуры с различным типом теплопроводящей подложки на металлическом основании на примере транзистора BLF578XR. URL: <http://jurnal.org/articles/2016/electron1.html> (дата обращения: 17.05.2017).
3. Карбид-кремниевые СВЧ MESFET-транзисторы. Краткий каталог продукции ПРОСОФТ. URL: <http://www.prochip.ru/cms/f/370103.pdf> (дата обращения: 18.05.2017).
4. КТ 9197 Б. Мощный СВЧ генераторный транзистор для работы в метровом диапазоне волн. URL: [http://web.vrn.ru/vesta1/transistors/power\\_lowvoltage/kt\\_9197\\_b/kt\\_9197\\_b.htm](http://web.vrn.ru/vesta1/transistors/power_lowvoltage/kt_9197_b/kt_9197_b.htm) (дата обращения: 14.04.2017).
5. Сивухин В. Н. Общий курс физики. В 5 т. Т. 4. Оптика. 5-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 544 с.
6. Справочник по теплообменникам. В 2-х т. / Пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2. 352 с.

7. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Металлургия, 1975. 368 с.

8. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. Теплообмен излучением / пер. с англ. Б. А. Хрусталева. М.: Мир, 1975. 934 с.

9. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. 2-е изд. М.: Энергия, 1977. 344 с.

10. Ачеркан Н. С. Справочник машиностроителя. В 6 т. М.: Машгиз, 1961. Т. 2. 559 с.

11. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. [и др.]. Физические величины: справ. / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.

12. Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. М.: Химия, 1974. 688 с.

13. Бульгин В. С. Теплоёмкость и внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса. М.: МФТИ, 2012. 13 с.

14. Ноздрев В. Ф., Сенкевич А. А. Курс статистической физики. М.: Высшая шк. 1966. 288 с.

---

**ВАВИЛОВ Игорь Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» (АВиРС), научный сотрудник НИЧ НИЛ «ДУМИТ МКА» при кафедре АВиРС.

Адрес для переписки: vava-igg@mail.ru

**ЛУКЪЯНЧИК Антон Игоревич**, ассистент, аспирант кафедры АВиРС.

Адрес для переписки: lukuanchik1991@mail.ru

**ЯЧМЕНЕВ Павел Сергеевич**, ассистент, аспирант кафедры АВиРС.

Адрес для переписки: yachmenev-pavel@mail.ru

**ЛЫСАКОВ Александр Викторович**, студент гр. ПРК-132 факультета транспорта, нефти и газа.

**ЛИТАУ Регина Николаевна**, студентка гр. ПРК-142 факультета транспорта, нефти и газа.

#### Для цитирования

Вавилов И. С., Лукьянчик А. И., Ячменев П. С., Литая Р. Н., Лысаков А. В. Применение тепла твердотельного СВЧ-элемента в дилатометрическом клапане-испарителе микро-двигателя малого космического аппарата // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1, № 1. С. 58–66.

Статья поступила в редакцию 03.07.2017 г.

© И. С. Вавилов, А. И. Лукьянчик, П. С. Ячменев,  
А. В. Лысаков, Р. Н. Литая

# APPLICATION OF HEAT OF SOLID-STATE MICROWAVE ELEMENT IN DILATOMETRIC EVAPORATOR VALVE OF MICRO THRUSTER OF A SMALL SPACECRAFT

I. S. Vavilov, A. I. Lukyanchik, P. S. Yachmenev,  
R. N. Litau, A. V. Lysakov

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article is devoted to experimental processing and theoretical investigation of the method of cooling the crystal of the microwave transistor of correcting micro thruster for small spacecraft. A distinctive feature of the proposed method is the use of heat removed from the microwave transistor in the dilatometric evaporator valve.

In general, this work is a continuation of the work on the creation of methodological bases for the design of the micro thruster correction microcircuit with microwave heating of the working fluid. In this article we are talking about cooling the microwave transistor in vacuum conditions with the use of the extracted energy in the dilatometric valve and for preheating the working fluid before entering the microwave chamber.

**Keywords:** small spacecraft, air, thruster, flow, microwave, rod, gas pipe.

## Acknowledgments

These studies are carried out within the framework of financial support by the Russian Foundation for Basic Research under Contract No. 31 16-38-60089\15 of 02.12.2015 (Research No. Gr.44-15, registration No. AAAA-A161160202100195).

## References

- Vavilov I. S., Kositsyn V. V., Luk'yanchik A. I. [et al.]. O vozmozhnosti razlozheniya ammiaka SVCH-vozddeystviyem v korrektruyushchem mikrovdigatele malogo kosmicheskogo apparata [On the possibility of decomposition of ammonia by microwave exposure in the correcting micro thruster jet of a small spacecraft] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2016. No. 6 (150). P. 58–63. (In Russ.).
- Kucheruk V. V., Lebedev N. V., Soribekyan A. M. Issledovaniye zavisimosti vykhodnykh parametrov ot temperatury s razlichnym tipom teploprovodyashchey podlozhki na metallicheskom osnovanii na primere tranzistora BLF578XR [Investigation of the dependence of the output parameters on the temperature with different types of heat-conducting substrate on a metal substrate using the example of the BLF578XR transistor]. URL: <http://jurnal.org/articles/2016/electron1.html> (accessed 17.05.2017). (In Russ.).
- Karbid-kremniyevyye SVCH MESFET-tranzistory. Kratkiy katalog produktsii PROSOFT [Carbide-silicon microwave MESFET-transistors. PROSOFT's short product catalog]. URL: <http://www.prochip.ru/cms/f/370103.pdf> (accessed 18.05.2017). (In Russ.).
- KT 9197 B. Moshchnyy SVCH generatorny tranzistor dlya raboty v metrovom diapazone voln [CT 9197 B. Powerful microwave generator transistor for operation in a meter wave range]. URL: [http://web.vrn.ru/vesta1/transistors/power\\_lowvoltage/kt\\_9197\\_b/kt\\_9197\\_b.htm](http://web.vrn.ru/vesta1/transistors/power_lowvoltage/kt_9197_b/kt_9197_b.htm) (accessed 14.04.2017). (In Russ.).
- Sivukhin V. N. Obshchiy kurs fiziki. V 5 t. T 4. Optika [General Course of Physics: Textbook. In 5 vol. Vol. 4. Optics]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2005. 544 p. (In Russ.).
- Spravochnik po teploobmennikam. V 2 t. T. 2 / Per. s angl. pod red. O. G. Martynenko [I dr.]. [Reference book on heat exchangers: 2 Vol. Vol. 2 / Trans. with English. Ed. O. G. Martynenko [et al.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 352 p. (In Russ.).
- Kazantsev E. I. Promyshlennyye pechi. Spravochnoye rukovodstvo dlya raschetov i proyektirovaniya. [Industrial furnaces. Reference manual for calculations and design]. Moscow: Metallurgy Publ., 1975. 368 p. (In Russ.).
- Zigel' R., Khaell Dzh. Teploobmen izlucheniym: per. s angl. B. A. Khrustaleva. [Heat exchange by radiation: Russ. ed. B. A. Khrustalev.]. Moscow: Mir Publ., 1975. 934 p. (In Russ.).
- Mikheyev M. A., Mikheyeva I. M. Osnovy teploperedachi. [Fundamentals of heat transfer.]. Moscow: Energia Publ., 1977. 344 p. (In Russ.).
- Acherkan N. S. Spravochnik mashinostroytelya: v 6 t. T. 2. [Handbook of machine builder: 6 Vol. Vol. 2]. Moscow: Mashgiz Publ., 1961. 559 p. (In Russ.).
- Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskiy A. M. [i dr.]. Fizicheskiye velichiny: spravochnik [Physical quantities: reference book]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991. 1231 p. (In Russ.).
- Berd R., St'yuart V., Layftut E. Yavleniya perenosa [Transport phenomena]. Moscow: Khimiya Publ., 1974. 688 p. (In Russ.).
- Bulygin V. S. Teployemkost' i vnutrennyaya energiya gaza Van-der-Vaal'sa [Heat capacity and internal energy of van der Waals gas]. Moscow: MFTI Publ., 2012. 13 p. (In Russ.).
- Nozdrev V. F., Senkevich A. A. Kurs statisticheskoy fiziki [Course of Statistical Physics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1966. 288 p. (In Russ.).

**VAVILOV Igor Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aviation and Rocketry (AVIRS) Department; Research Associate of the Research Laboratory «DUMIT MCA». Address for correspondence: vava-igg@mail.ru



**LUKYANCHIK Anton Igorevich**, Assistant, Post-graduate Student of the AVIRS Department.

Address for correspondence: lukyanchik1991@mail.ru

**YACHMENEV Pavel Sergeevich**, Assistant, Post-graduate Student of the AVIRS Department.

Address for correspondence: yachmenev-pavel@mail.ru

**LYSAKOV Alexander Viktorovich**, Student, gr. PRK-142, Transport, Oil and Gas Faculty.

**LITAU Regina Nikolaevna**, Student, gr. PRK-142, Transport, Oil and Gas Faculty.

#### For citations

Vavilov I. S., Lukyanchik A. I., Yachmenev P. S., Lysakov A. V., Litau R. N. Application of heat of solid-state microwave element in dilatometric evaporator valve of micro thruster of a small spacecraft // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2017. Vol. 1, no. 1. P. 58–66.

Received 03 July 2017.

© I. S. Vavilov, A. I. Lukyanchik, P. S. Yachmenev,  
A. V. Lysakov, R. N. Litau