

мопроизвольному (без изменения параметров режима испытаний извне) увеличению температуры лицевой поверхности УВТК вплоть до  $T_w = 2500\text{--}2600$  °С. При этом константа скорости гетерогенной рекомбинации атомов и ионов потока  $K_w$  увеличивается на порядок – от 3–5 до 30–36 м/с. Увеличение каталитической активности поверхности, по-видимому, связано с ионной имплантацией в  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2$  атомарного кислорода и последующими актами рекомбинации с его участием.

Дополнительное введение в УВТК на основе системы  $(\text{Me}^{4+})\text{B}_2\text{--SiC}$  силицидных фаз  $(\text{MoSi}_2, (\text{Me}^{4+})\text{Si}_2)$  увеличивает долю образующегося при окислении боросиликатного стекла. Это может быть оправдано, прежде всего, в тех случаях, когда требуется максимизировать теплоотвод посредством эндотермических процессов плавления и уноса части массы с поверхности (унос расплава, выделение газообразных продуктов).

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00352-П в части исследования каталитических свойств УВТК.*

#### Список литературы

1 Methodology of studying high-velocity plasma flow impact on high-temperature materials / A. N. Astapov, B. E. Zhestkov, I. V. Senyuev, V. V. Shtapov // AIP Conference Proceedings. – XLV Academic space conference, dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding national scientists – pioneers of space exploration. – Moscow, Russia, 30 March – 2 April, 2021. – 2023. – Vol. 2549, № 1. – 210009. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0109458> (date of access: 05.09.2025).

УДК 531.3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ МОТОВЕЛОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

*Н. А. АХРАМЕНКО, М. В. БУЙ, И. И. ПРОНЕВИЧ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В последние годы в Республике Беларусь наблюдается увеличение числа мотовелотранспортных средств. Развитию велосипедного движения способствует «Концепция развития велосипедного движения в Республике Беларусь». В связи с этим исследования в области безопасности и надежности мотовелотранспортных средств являются актуальными.

При движении вело- или мототранспорта со скоростью  $v$  на него действует некоторая сила сопротивления  $\vec{F}$  (далее рассматриваем проекции сил на горизонтальную ось). Она складывается из постоянной составляющей (определяется коэффициентом  $A$ ) и составляющей, пропорциональной скорости движения (определяется коэффициентом  $B$ ), в значительной степени обусловленной аэродинамическим сопротивлением

$$F = -A - Bv. \quad (1)$$

Знак минус в выражении (1) указывает на то, что сила направлена противоположно направлению движения. Используем второй закон Ньютона (в проекции на горизонтальную ось) в виде [1, 2]

$$\frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} = F, \quad (2)$$

где  $p$  – импульс транспортного средства;  $m$  – масса транспортного средства.

Из выражений (1) и (2) получаем уравнение для скорости  $v$

$$m \frac{dv}{dt} = -A - Bv. \quad (3)$$

Преобразуем выражение (3) к следующему виду

$$\frac{dv}{dt} + \frac{B}{m}v = -\frac{A}{m}. \quad (4)$$

Получили линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка. Введем обозначения

$$\alpha = \frac{A}{m} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{B}{m}. \quad (5)$$

С учетом соотношений (5) выражение (4) переписывается в виде

$$\frac{dv}{dt} + \beta v = -\alpha. \quad (6)$$

Сначала решаем соответствующее (6) линейное однородное уравнение первого порядка

$$\frac{dv}{dt} + \beta v = 0 \quad \text{или} \quad \frac{dv}{dt} = -\beta v. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) можно записать в виде

$$v^* = C_1 e^{-\beta t}, \quad (8)$$

где  $C_1$  – некоторая константа.

Далее, зная решение (8), используем метод вариации произвольных постоянных при нахождении общего решения линейного неоднородного уравнения и получаем

$$v = C e^{-\beta t} - \frac{\alpha}{\beta}, \quad (9)$$

где  $C$  – произвольная постоянная.

Пусть в начальный момент времени скорость была равна  $v_0$ . Подставляя в выражение (9), получим

$$v(0) = v_0 = C - \frac{\alpha}{\beta}. \quad (10)$$

Из соотношения (10) находим произвольную постоянную

$$C = v_0 + \frac{\alpha}{\beta}. \quad (11)$$

Подставляя из (11) постоянную  $C$  в соотношение (9), получим

$$v = \left( v_0 + \frac{\alpha}{\beta} \right) e^{-\beta t} - \frac{\alpha}{\beta}. \quad (12)$$

Пусть через промежуток времени  $T$  скорость становится равной нулю. Используя выражение (12), запишем

$$v(T) = 0 \Rightarrow \frac{\alpha}{\beta} = \left( v_0 + \frac{\alpha}{\beta} \right) e^{-\beta T}. \quad (13)$$

Из соотношения (13) можно выразить промежуток времени  $T$ :

$$T = \frac{1}{\beta} \ln \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} v_0 \right). \quad (14)$$

Путь, пройденный от начала движения до остановки,

$$s = \int_0^T v(t) dt. \quad (15)$$

Подставляя выражение (12) в соотношение (15), после интегрирования получаем

$$s = \frac{1}{\beta} \left( v_0 + \frac{\alpha}{\beta} \right) \left[ 1 - e^{-\beta T} \right] - \frac{\alpha}{\beta} T. \quad (16)$$

Выражение (13) легко преобразовывается к виду:

$$e^{\beta T} = 1 + \frac{\beta}{\alpha} v_0 \quad (17)$$

Из выражения (14) также находим величину  $\beta$ :

$$\beta = \frac{1}{T} \ln \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} v_0 \right). \quad (18)$$

Соотношения (17) и (18) подставляем в (16), в результате чего получаем

$$s = \frac{T v_0}{\ln \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} v_0 \right)} - \frac{\alpha}{\beta} T. \quad (19)$$

Пусть  $x = \beta / \alpha$ , тогда выражение (19) переписывается в виде

$$s = \frac{T v_0}{\ln(1 + x v_0)} - \frac{T}{x}. \quad (20)$$

Таким образом, получили одно уравнение с одной неизвестной, величины  $T$ ,  $v_0$  и  $s$  считаем заданными (определяются из эксперимента). Находя из него  $x = \beta / \alpha$  и подставляя в (18), находим величину  $\beta$ . Далее находим величину  $\alpha = \beta / x$ .

Из соотношения (5) находятся параметры  $A$  и  $B$ :

$$A = \alpha m \quad \text{и} \quad B = \beta m. \quad (21)$$

Таким образом, для определения параметров сопротивления движению при горизонтальном (без подъемов и спусков) движении можно провести измерения начальной скорости, массы транспортного средства, времени движения до остановки и пройденный до остановки путь. В данном случае пройденный до остановки путь зависит только от запаса кинетической энергии, которая соответствовала начальной скорости  $v_0$ . Также следует отметить, в данной идеализированной модели скорость ветра считается равной нулю. Учет этой скорости, соответственно, внесет корректировку в методику расчетов.

#### Список литературы

- 1 Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 17-е изд., стер. – М. : Академия, 2008. – 560 с.
- 2 Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 3-е изд., испр. – М. : Наука, 1990. – 624 с.

УДК 536

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЯХ

*А. В. БАБАЙЦЕВ, С. А. КОЛЕСНИК, Н. А. ТУШАВИН*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Определение теплообмена математическим моделированием всех космических аппаратов является нетривиальной задачей, которая связана с учетом тепловых процессов, проходящих в сложных структурах и обусловленных значительной неопределенностью протекания физических процессов внешнего и внутреннего теплообмена между элементами изделия. Один из таких элементов – терморегулирующие покрытия, представляющие собой многослойные структуры с существенно отличающимися между слоями свойствами. В качестве первоначальной задачи рассматривается терморегулирующее покрытие, состоящее из двух слоев. Для этого решается двумерная задача теплообмена в двухслойной пластине в нестационарной постановке. Каждый слой образован из разных материалов и имеет свои теплофизические характеристики: плотность, теплопроводность, теплоемкость и описывается своим уравнением теплопроводности.

Задано начальное условие в виде постоянной температуры. На каждой границе задается тепловой поток (граничные условия 2-го рода). Условия сопряжения на границе раздела: неразрывность температуры и равенство тепловых потоков. Решаем методом разделения переменных, получаем решение в виде разложения в ряд по собственным функциям.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (FSFF-2025-0001).*