

УДК 629.76

Экспериментальные исследования процесса конвективного теплообмена при испарении керосина и воды в замкнутом объеме*

В.И. Трушляков¹, И.Ю. Лесняк¹, Л. Гальфетти²

¹Омский государственный технический университет

²Миланский технический университет, Италия

E-mail: lesnyak.ivan@gmail.com

Проведены исследования процесса испарения керосина и воды на основе конвективного теплообмена в экспериментальной установке, моделирующей характерный объем топливного бака ступени ракеты-носителя. В качестве базовых критериев подобия при выборе конструктивных параметров данной установки — параметров теплоносителя, модельных жидкостей — использованы числа Рейнольдса, Прандтля, Био и Нуссельта. В качестве теплоносителя применялись газы, в том числе воздух, азот, а также в стадии предварительных экспериментов рассматривались продукты сгорания полибутадиена с концевыми гидроксильными группами (Hydroxyl-terminated polybutadiene, НТРВ). Приняты граничные условия для жидкости, расположенной на пластине в виде капли, а также при ее равномерном пленочном располнении на пластине, размещаемой в экспериментальной модельной установке. На основе проведенных исследований получены значения температур для системы «газ–жидкость–стенка», определены площади массоотдающей поверхности и коэффициенты теплоотдачи газ–жидкость, газ–платина для теплоносителей — воздух, азот — и для жидкостей — вода, керосин. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с известными данными. Сформулированы предложения для проведения экспериментов с использованием теплоносителя на основе продуктов сгорания НТРВ.

Ключевые слова: тепломассообмен, топливные баки, газификация, компоненты топлива.

Введение

Невырабатываемые остатки топлива (до 3 % и более от начальной заправки) в баках ступеней ракет с маршевыми жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) являются источниками взрывов ступеней ракет-носителей (РН) на орбитах, пожаров в районах их падения, способствуют резкому ухудшению динамических характеристик отработанной ступени при движении на атмосферном участке траектории спуска [1]. Для исключения негативного влияния невырабатываемых остатков топлива в баках отработанных ступеней РН разрабатывается бортовая система, обеспечивающая извлечение этих остатков топлива на основе подачи в топливные баки соответствующих теплоносителей (ТН) [2–4]. Для каждого типа компонента топлива выбирается соответствующий ТН с определенными

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания подведомственным образовательным организациям, проект «Повышение экологической безопасности и экономической эффективности ракет-носителей с маршевыми жидкостными ракетными двигателями», заявка № 9.1023.2017/ПЧ.

физико-химическими характеристиками, к которым относятся химический состав, температура, массовый секундный расход, схема ввода в топливный бак.

В топливном баке РН после выключения маршевого ЖРД и приложения тормозного импульса при разделении ступеней граничное положение жидких остатков топлива носит случайный характер. Проведенные экспериментальные исследования в башне невесомости [5] показали возможные варианты расположения остатков жидкости после выключения маршевого ЖРД и приложения тормозного импульса. На основании этих исследований приняты возможные варианты граничных условий жидкости, определяющихся ее расположением в виде капли или равномерным пленочным расположением на пластине [6].

Для исследования процесса конвективного теплообмена, происходящего в топливном баке РН, авторами разработан экспериментальный стенд, включающий в свой состав систему получения ТН, экспериментальную модельную установку (ЭМУ), систему измерений, регистрации и обработки результатов измерений, соединительную и запорную арматуру [7].

Условия протекания процессов конвективного теплообмена в топливном баке между ТН, жидкостью, стенками бака и газа наддува существенно отличаются от условий протекания известных тепловых процессов, граничных условий, конструкционных материалов [8–14], поэтому использование существующих коэффициентов теплоотдачи невозможно и их необходимо определять экспериментально для каждого варианта реализации процесса тепломассообмена, определяемого параметрами ТН, граничным расположением жидкости, конструкцией бака, термодинамическими параметрами внутри бака и т.д. Необходимость определения коэффициентов теплоотдачи подтверждается проведенной оценкой с использованием разработанной математической модели [6], чувствительной по отношению к изменению коэффициентов теплоотдачи от газа к ТН и жидкости. Изменение коэффициента теплоотдачи на 1 % приводит к ошибке в количестве подводимой энергии на 0,2 %, при этом скорость испарения жидкости будет определяться с ошибкой в 1,6 %. Таким образом, корректное определение коэффициентов теплоотдачи является критически важным из-за степени их влияния на достоверность получаемых результатов.

На рис. 1 представлена общая схема процесса газификации жидких остатков топлива в баках РН при вводе ТН в баки горючего и окислителя.

Для проведения экспериментальных исследований конвективного теплообмена, моделирующего процесс газификации в баке жидких остатков топлива на наземном экспериментальном стенде, необходимо обеспечить подобия исследуемого процесса.

С целью использования существующей ЭМУ выполнение критериев подобия достигалось путем обеспечения следующих основных параметров: температуры ТН и скорости потока ТН. В табл. 1 приведены значения критериев подобия Рейнольдса, Нуссельта и Био для оценки возможности моделирования термодинамических процессов в существующей ЭМУ на примере газификации керосина в баке второй ступени РН типа «Союз-2.1в». Из таблицы следует, что выбором параметров ТН (температура, скорость натекания, кинематическая вязкость) для существующей ЭМУ с характерным размером возможно

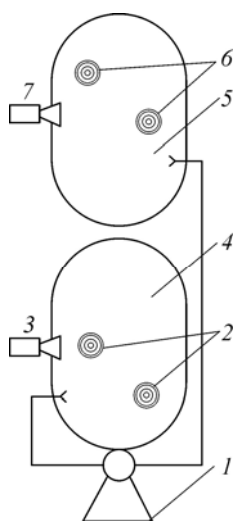


Рис. 1. Схема системы газификации жидких остатков топлива в баках РН и утилизации газифицированных продуктов.

1 — маршевый ЖРД, 2 — жидкие остатки горючего (керосина), 3 — газогенератор, подающий ТН в бак горючего, 4 — бак горючего (керосин), 5 — бак окислителя (жидкий кислород), 6 — остатки окислителя (жидкого кислорода), 7 — газогенератор, подающий ТН в бак окислителя.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования процессов тепломассообмена, происходящих в баке ступени РН, на примере газификации керосина в существующей ЭМУ

№ п/п	Параметры	Бак горючего	ЭМУ
1	Характерный размер, м	Длина бака — 2,3	Диаметр ЭМУ — 0,245
2	Теплоноситель	Продукты сгорания в газогенераторе: керосин + кислород (1:0,7)	Азот
3	Температура ТН, К	1470–1500	373–423
4	Скорость ТН, м/с	5–6	8–15
5	Кинематическая вязкость ТН, м ² /с	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$36 \cdot 10^{-6}$
6	Число Рейнольдса	$10^5 - 1,6 \cdot 10^5$	$9 \cdot 10^4 - 1,4 \cdot 10^5$
7	Число Нуссельта	350–440	330–420
8	Число Био	0,005	0,005

обеспечить условия подобия процесса тепломассообмена по основным критериям (Re , Nu , Bi).

1. Постановка задачи исследований

Для экспериментального определения коэффициентов теплоотдачи от смеси газов, состоящей из ТН, газа наддува, испарившегося компонента, к жидкости $\alpha_{г-ж}$ и пластине $\alpha_{г-пл}$, на которой располагается жидкость, необходимо разработать экспериментальный стенд, в который входят система получения ТН, ЭМУ, система измерений, регистрации и обработки результатов измерений, соединительная и запорная арматура с учетом обеспечения критериев подобия, приведенных в табл. 1; программу экспериментов; исходные данные для проведения исследований, к которым относятся: температура, расход, химический состав ТН, а также масса, температура, граничное условие и химический состав модельной жидкости в соответствии с параметрами, приведенными в табл. 1.

Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{г-ж}$, $\alpha_{г-пл}$ определялись по формуле, предложенной в работе [15]:

$$\alpha_i = Q_k / (t_1 - t_2) F, \quad (1)$$

где Q_k — конвективный тепловой поток от ТН к жидкости и пластине, Вт; t_1 — температура ТН, К; t_2 — температура жидкости или пластины, К; F — площадь поверхности жидкости или пластины, м²; i — элементы, участвующие в теплообмене газ–жидкость или газ–пластина.

С использованием полученных значений коэффициентов теплоотдачи, а также теплопроводности ТН и размеров пластины определялись числа Нуссельта:

$$Nu = \alpha_i d_{пл} / \lambda_{ТН}, \quad (2)$$

где $d_{пл}$ — диаметр пластины, м; $\lambda_{ТН}$ — коэффициент теплопроводности ТН, Вт/мК.

Расчетная схема оценки параметров процесса теплообмена пластина–жидкость с использованием числа Bi с учетом того, что жидкость находится на пластине конечных размеров в неподвижном состоянии, представлены в справочнике по теплопередаче [16].

При проведении экспериментов были приняты следующие ограничения и допущения:

1. Температуры стенок ЭМУ, как металлических, так и стеклянных, газа в объеме ЭМУ, жидкости на пластине принимаются усредненными для каждого участника теплообмена, т.е. градиент температуры практически отсутствует.

2. Рассматривается термодинамическое воздействие (конвективный теплообмен) на жидкость на основе подачи ТН на поверхность жидкости, находящейся внутри ЭМУ, без химического взаимодействия.

3. В процессе испарения предполагается «замерзшее» состояние жидкости, т.е. фиксированное, без колебаний свободной поверхности жидкости.

4. Для ЭМУ тепловые потоки между жидкостью и стенкой ЭМУ отсутствуют, так как модельная жидкость расположена на пластине, а тепловые потоки между пластиной и стенкой ЭМУ из-за установки тепловых изоляторов пренебрежимо малы.

5. Коэффициент теплоотдачи от ТН к газу постоянен по времени процесса ($\alpha_{ТН} = \text{const}$) и на данном этапе эксперимента не определяется.

2. Экспериментальный стенд

Экспериментальные исследования по определению коэффициентов теплоотдачи (1) проводились с помощью экспериментального стенда в лаборатории SPLab Миланского технического университета (рис. 2), созданного с учетом теории подобия (табл. 1). Данный стенд, разработанный по совместному техническому заданию с Миланским техническим университетом, позволяет проводить исследования с использованием различных по составу ТН, в том числе воздуха, азота и продуктов сгорания твердого топлива. На настоящем этапе исследований использовалось твердое топливо из полибутиадена с концевыми гидроксильными группами (Hydroxyl-terminated polybutadiene НТРВ), которое применяется в качестве ракетного топлива. Экспериментальный стенд состоит из следующих частей:

– системы получения ТН, на основе сжигания твердого топлива типа НТРВ (с температурой горения до 1073 К и давлением в камере сгорания до 0,5 МПа) или с использованием компрессора с ресивером или баллонов с газом (азотом) и нагревателя (при температуре ТН в диапазоне от 293 до 423 К и секундном расходе до 25 л/мин);

– ЭМУ высотой 0,135 м, диаметром 0,245 м с толщиной стенки 0,005 м и с наличием устройства ввода ТН (избыточное давление внутри достигает до 0,2 МПа);

– системы измерений, регистрации и обработки результатов измерений, состоящей из мобильных датчиков температуры, датчиков давления и расхода, видеокамеры, осциллографа;

– соединительной и запорной арматуры, представляющей собой систему шлангов, штуцеров, шаровых кранов, которые обеспечивают герметичность соединений при избыточном давлении до 0,5 МПа.

При проведении экспериментальных исследований в качестве испаряемых жидкостей использовались авиационный керосин Jet A-1 (C₁₂H₂₃) и модельная жидкость–вода. Модельная жидкость располагалась на пластине, изготовленной из алюминия. Параметры пластины были следующими: толщина стенки $\delta = 0,002$ м, ее диаметр $d = 0,06$ м, степень черноты поверхности пластины $\varepsilon \approx 0,11$.

Схема входа потока ТН и вывода газа (состоящего из испарившейся жидкости, ТН и газа наддува в ЭМУ) из ЭМУ представлена на рис. 3. Погрешность измерений температур стенок, газа и жидкости с использованием многоканального измерителя температур МИТ-12 и термопар ТХА составляет ± 1 °С.

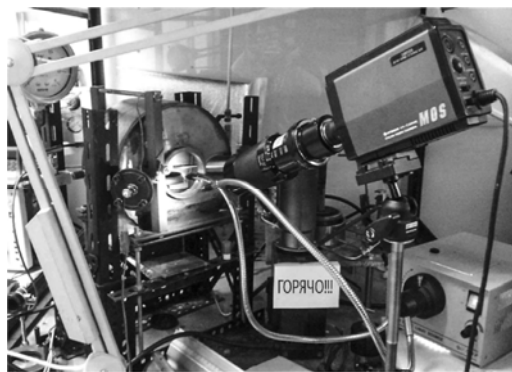
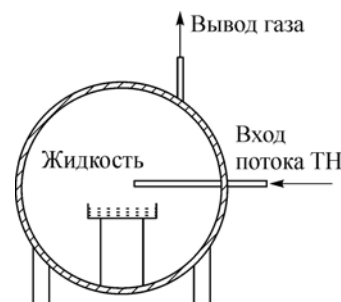


Рис. 2. Экспериментальный стенд для исследования процессов испарения жидкостей.

Рис. 3. Схема входа потока ТН и вывода газа (испарившаяся жидкость + ТН + газ наддува в ЭМУ) из ЭМУ.



3. Результаты экспериментов

3.1. Процесс испарения жидкости при равномерном пленочном расположении ее на пластине («зеркало»)

Процесс испарения жидкости при равномерном пленочном расположении ее на пластине осуществлялся при следующих параметрах: начальная температура воздуха внутри ЭМУ составляла 295 К, температура ТН (азот, воздух) на входе в ЭМУ — 373 ± 2 К, температура окружающей среды — 295 К, расход ТН (азот, воздух) — до 25 л/мин; испаряемая жидкость, объем которой равен 7,5 мл, состояла из керосина марки Jet A-1 и воды.

На рисунках 4 и 5 приведены графики изменения температур нагрева жидкостей (керосина и воды), газа в объеме ЭМУ и стенки ЭМУ по времени процесса испарения жидкостей, расположенных равномерно на пластине. Отмечается, что измерение температур при проведении экспериментов проводилось с использованием трех термопар, установленных на стенке ЭМУ, на поверхности жидкости и в объеме ЭМУ. Сравнительный анализ результатов экспериментов (рис. 4, 5) показал, что испарение воды происходит быстрее, чем керосина, что объясняется высокой температурой кипения керосина (до 573 К) по сравнению с водой. С момента времени 1500 с (рис. 4) происходит оголение термопары и резкое увеличение температуры. На графике рис. 5 видно, что температура керосина, газа и стенки ЭМУ плавно увеличивается без скачков до полного испарения керосина. Фиксация изменения уровня испаряемой жидкости (воды, керосина) по времени проведения эксперимента осуществляется с использованием высокоскоростной видеокамеры и специально установленного измерительного устройства в виде цилиндра со шкалой с ценой деления 1 мм.

На рисунках 6 и 7 линией 1 представлены экспериментальные данные изменения уровня воды и керосина, расположенных на пластине ($\bar{h} = h/h_{\text{нач}}$), которые соответствуют времени проведения эксперимента ($\bar{t} = t/t_{\text{полн}}$). Начальный уровень воды и керосина на пластине $h_{\text{нач}} = 0,0035$ м. Линия 2 — квадратичные аппроксимации изменения уровня воды $h_{\text{в}}$ и керосина $h_{\text{к}}$ на пластине, записанные в виде полиномов второй степени

$$h_{\text{в}} = (-0,8636\bar{t}^2 - 0,1818\bar{t} + 1,0118)h_{\text{нач}} \quad (3)$$

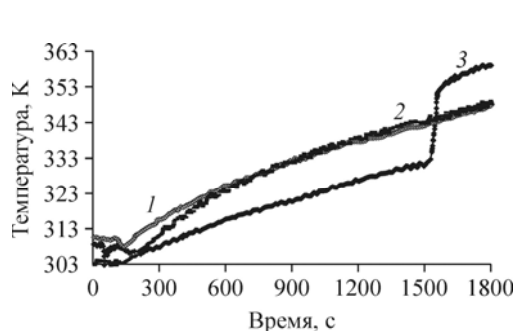


Рис. 4. График изменения температуры воды, газа и стенки ЭМУ. Температуры газа (1), стенки (2) и воды (3).

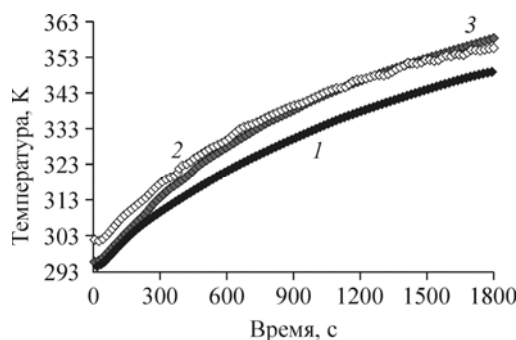


Рис. 5. График изменения температуры керосина, газа и стенки ЭМУ. Температуры газа (1), стенки (2) и керосина (3).

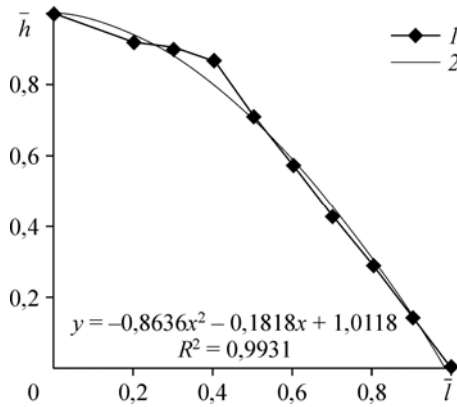


Рис. 6. График изменения уровня воды на пластине.

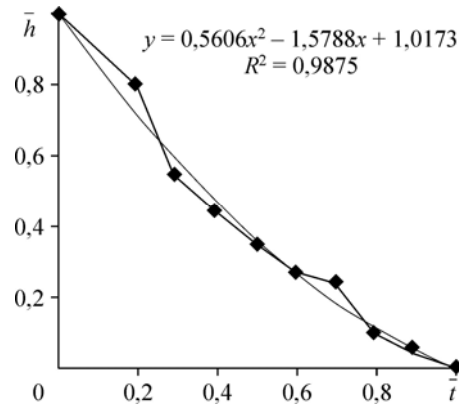


Рис. 7. График изменения уровня керосина на пластине.

и
$$h_k = (0,5606\bar{t}^2 - 1,5788\bar{t} + 1,0173)h_{нач}. \quad (4)$$

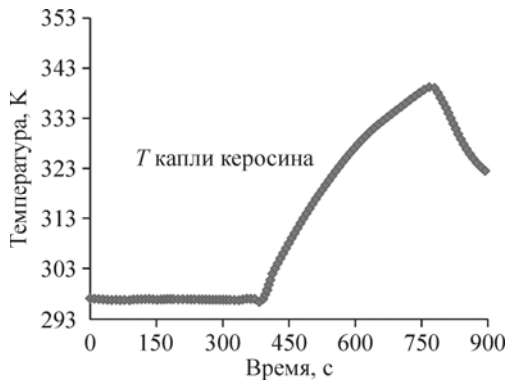
Для получения аппроксимационных формул (3) и (4) определены соответственно коэффициенты детерминации $R^2 = 0,9931$ и $R^2 = 0,9875$, показывающие долю дисперсии экспериментальных точек изменения уровня воды и керосина ввиду погрешности измерений.

3.2. Процесс испарения капли жидкости, расположенной на пластине

Процесс испарения капли жидкости, расположенной на поверхности пластины, осуществлялся при параметрах, приведенных в п. 3.1, при объеме испаряемой жидкости (керосин Jet-A1), составляющем от 0,03 до 0,05 мл.

Поскольку керосин является жидкостью с высокой смачиваемостью, то для получения капли керосина использовалась термопара, которая не допускала растекания капли на пластине и позволяла определить изменение ее температуры. На рис. 8 приведен график изменения температуры капли керосина по времени процесса испарения. Анализ результатов исследований процесса газификации капли керосина показал, что с начального момента времени до 390 с температура капли не изменяется; с момента времени 390 с до 750 с наблюдается резкое увеличение температуры капли на 30 % от начального значения; с момента времени 750 с наблюдается резкое уменьшение температуры, что объясняется оголением термопары и замыканием ее с поверхностью пластины.

На рисунке 9 представлены видеок кадры процесса эволюции капли керосина в процессе ее нагрева и испарения.



На рис. 10 линией 1 показаны экспериментальные данные по изменению площади испаряемой капли керосина S_k , расположенной на пластине ($\bar{S} = S_k/S_{нач}$), соответствующие времени проведения эксперимента ($\bar{t} = t/t_{полн}$), линия 2 — квадратичная аппроксимация изменения площади капли керосина S_k , записанная

Рис. 8. График изменения температуры капли керосина.

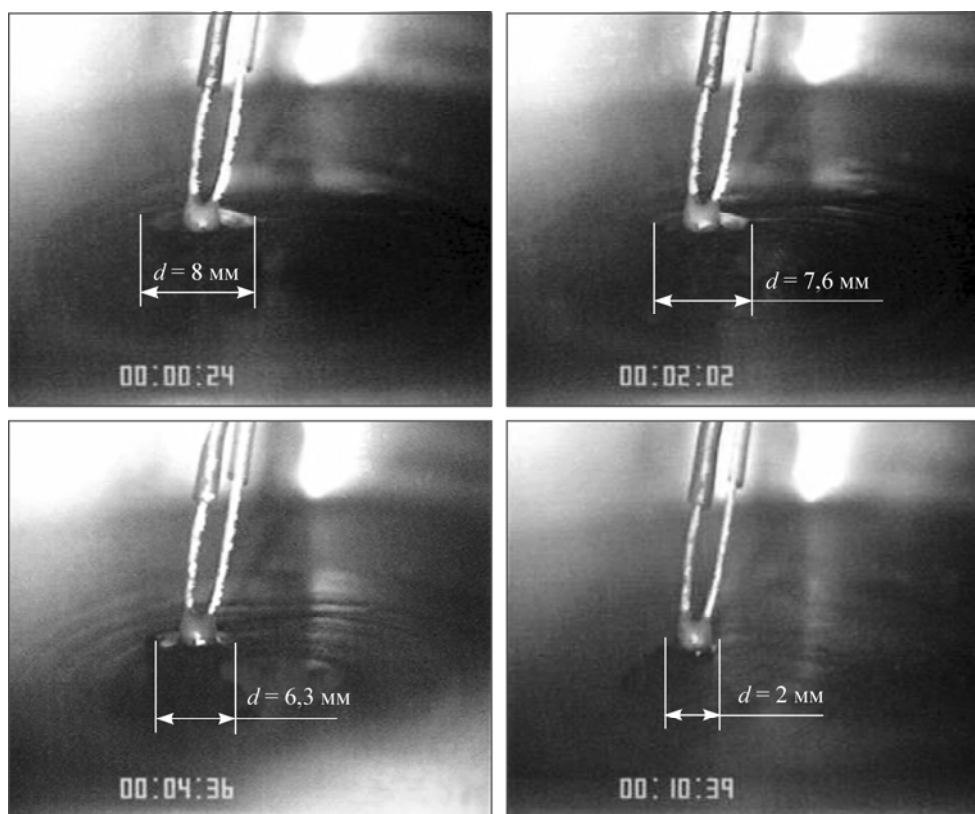


Рис. 9. Фрагменты фотосъемки процесса нагрева и испарения капли керосина.

в виде полинома второй степени

$$S_k = (-0,1166\bar{t}^2 - 0,9525\bar{t} + 1,0534) \cdot S_{\text{нач}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{нач}} = 50 \text{ мм}^2$ — начальная площадь пятна контакта капли керосина. Для полученной аппроксимационной формулы (5) определен коэффициент детерминации $R^2 = 0,9771$, показывающий долю дисперсии экспериментальных точек изменения площади пятна контакта капли керосина ввиду погрешности измерений. Аппроксимационные формулы (3)–(5) используются для уточнения математической модели процесса испарения воды и керосина.

Полученные результаты позволили провести предварительные оценки по изменению коэффициентов теплоотдачи при различных скоростях ТН (табл. 2).

Для получения уточненных зависимостей в виде критериальных уравнений с использованием экспериментальных данных строились графики $\lg Re - \lg Nu$ и $\lg (Nu/Re) - \lg Pr$, по которым определялись значения коэффициентов C и показатели степени m, n :

$$Nu = C Re^m Pr^n. \quad (6)$$

Рис. 10. График изменения площади капли керосина на пластине.

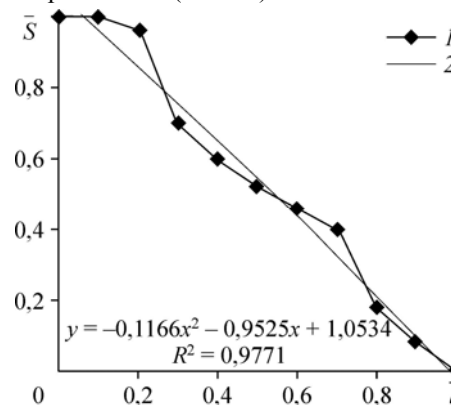


Таблица 2

Значения коэффициентов теплоотдачи в системах газ–жидкость и газ–пластина при различных значениях скоростей потока ТН в ЭМУ и граничных условиях расположения жидкости на пластине

Скорость потока ТН, м/с	Re	Газ–пластина		Газ–керосин «зеркало»		Газ–вода «зеркало»		Газ–керосин «капля»	
		Nu	$\alpha_{т-пл}$, Вт/м ² ·К	Nu	$\alpha_{т-ж}$, Вт/м ² ·К	Nu	$\alpha_{т-ж}$, Вт/м ² ·К	Nu	$\alpha_{т-ж}$, Вт/м ² ·К
8	$5,69 \cdot 10^4$	343	44,1	353	45,4	366	51,6	343	48,3
9	$6,04 \cdot 10^4$	367	47,2	378	48,6	392	55,2	366	51,6
10	$7,11 \cdot 10^4$	390	50,1	402	51,7	416	58,6	389	54,8

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований можно предложить следующие уточненные критериальные уравнения:

$$\text{– от газа к пластине: } Nu = 0,05 Re^{0,65} Pr^{0,43}, \quad (7)$$

$$\text{– от газа к керосину («зеркало»): } Nu = 0,04 Re^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (8)$$

$$\text{– от газа к керосину («капля»): } Nu = 0,05 Re^{0,75} Pr^{0,43}, \quad (9)$$

$$\text{– от газа к воде («зеркало»): } Nu = 0,05 Re^{0,57} Pr^{0,43}. \quad (10)$$

Для подтверждения достоверности результатов проводимых исследований проведен сравнительный анализ полученного критериального уравнения (7) с известной зависимостью (11) для теплообмена при турбулентном обтекании плоской пластины вынужденным потоком [15, 17]:

$$Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,43}. \quad (11)$$

Результаты сравнительного анализа представлены на рис. 11.

Значения коэффициента $C = 0,05$ и показателей степени $n = 0,43$ и $m = 0,65$ зависят от режима течения (ламинарный, переходной, турбулентный). В рассматриваемом случае режим течения является турбулентным, поскольку $Re > Re_{кр}$, и составляет $9 \cdot 10^4 - 1,4 \cdot 10^5$.

Экспериментальное значение показателя степени $n = 0,43$ у числа Прандтля (Pr) соответствует показателю степени известной зависимости (11), поскольку в качестве потока ТН в обоих случаях используется воздух, для которого $Pr = 0,68$.

На рисунке 11 кривые (1) и (2) приближены друг к другу, при этом расхождение чисел Nu составляет до 10 %, поэтому можно предположить, что полученные результаты близки к достоверным.

В таблице 3 представлен сравнительный анализ коэффициентов C и показателей степени m, n полученной уточненной зависимости (7) и известной зависимости (11).

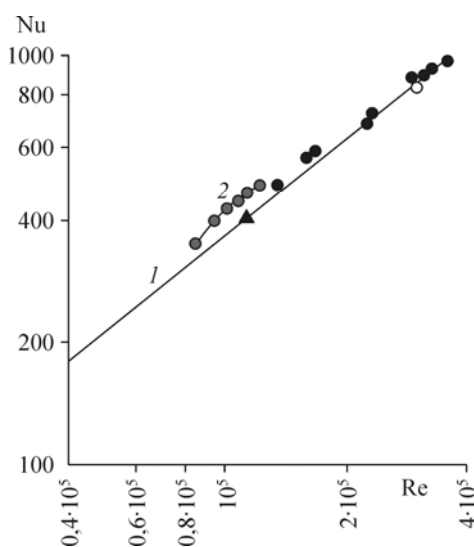


Рис. 11. Сравнительный анализ экспериментальных данных для теплообмена при турбулентном обтекании плоской пластины вынужденным потоком с известной зависимостью.

1 — известная зависимость $Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,43}$
2 — уточненная зависимость $Nu = 0,05 Re^{0,65} Pr^{0,43}$.

Таблица 3

Сравнительный анализ коэффициентов C и показателей степени m, n полученной уточненной зависимости (7) и известной зависимости (11)

Критериальные уравнения	Определяемые параметры		
	C	m	n
Известное $Nu = 0,037Re^{0,8}Pr^{0,43}$ (11)	0,037	0,8	0,43
Уточненное $Nu = 0,037Re^{0,65}Pr^{0,43}$ (7)	0,05	0,56	0,43
Отклонение от известной зависимости (E), %	26	42,9	0

Проведенный сравнительный анализ, представленный в табл. 3, показал, что отклонение коэффициента C от известной зависимости (11) составляет 26 %, а показателя степени m — 42,9 %, что можно объяснить, во-первых, конструктивным отличием экспериментальных установок, во-вторых, типом и схемой подачи ТН, в-третьих, методикой проведения экспериментов.

3.3. Процесс испарения модельной жидкости при использовании в качестве ТН продуктов сгорания твердого топлива

Процесс испарения модельной жидкости при равномерном пленочном расположении ее на пластине осуществлялся при следующих параметрах: ТН — продукты сгорания твердого топлива (НТРВ), начальная температура газа внутри ЭМУ — 295 К, температура окружающей среды — 295 К, модельная жидкость — вода, объем испаряемой модельной жидкости — от 18 до 20 мл.

На рисунке 12 приведен график изменения температуры ТН, газа в объеме ЭМУ и стенки ЭМУ по времени процесса испарения.

Анализ результатов исследований процесса испарения жидкости при использовании в качестве ТН продуктов сгорания твердого топлива НТРВ показал, что температура подаваемого ТН в ЭМУ резко увеличивается, при этом происходит незначительное увеличение температуры газа в ЭМУ, жидкости и стенок ЭМУ. После сгорания всего НТРВ расход и температура ТН резко уменьшаются до нуля. Определить значения температуры и площади испаряемой жидкости не представляется возможным из-за образования осадка на пластине от продуктов сгорания твердого топлива.

Следует отметить, что длительность процесса испарения зависит от количества сжигаемого НТРВ, при этом обеспечить постоянство температуры и расхода ТН на имеющемся оборудовании затруднительно.

4. Обсуждение полученных результатов

На основе анализа полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что коэффициенты теплоотдачи от газа к пластине и различным жидкостям, в данном случае воде и керосину, имеют различные значения, что связано с изменением параметров поверхностей теплообмена при вынужденной конвекции в закрытом объеме ЭМУ.

Если учесть, что в зависимости от критерия Re происходит изменение критерия Nu , а так же что характерный размер и теплопроводность элементов, участвующих в теплообмене, для всей серии

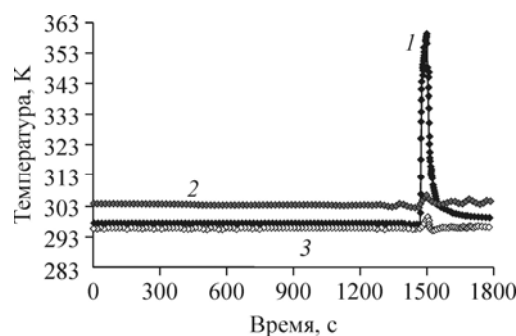


Рис. 12. График изменения температуры ТН (1), стенки ЭМУ (2) и газа внутри ЭМУ (3).

экспериментов сохраняют постоянные значения, то становится очевидно, что переменность Nu связана с изменением коэффициента теплоотдачи α_i . В свою очередь коэффициенты теплоотдачи зависят от изменения температур системы «газ–жидкость–стенка», площади массоотдающей поверхности испаряемой жидкости и параметров ТН (температура, скорость, удельная теплоемкость, теплопроводность), подаваемого в ЭМУ.

Полученное значение изменения уровня массоотдающей поверхности воды и керосина при дополнительном определении влажности газа позволят определить на последующих этапах исследований коэффициент массоотдачи.

Анализ результатов исследований процесса испарения жидкости при использовании в качестве ТН продуктов сгорания твердого топлива НТРВ показал, что при горении НТРВ происходит значительное выделение осадка на поверхности пластины, кратковременное и резкое увеличение температуры ТН, при этом обеспечить постоянство температуры и расхода ТН на данном этапе исследований затруднительно.

Выводы

Разработан экспериментальный стенд, включающий в свой состав ЭМУ, систему получения ТН, систему измерений, регистрации и обработки результатов измерений, соединительную и запорную арматуру. Экспериментальный стенд, удовлетворяющий критериям подобия Nu , Re , Pr и Bi , позволяет проводить моделирование термодинамических процессов, происходящих в баках ступеней РН в условиях невесомости.

Проведена серия экспериментальных исследований и получены результаты в виде значений температур жидкости (вода, керосин), стенки ЭМУ и газа в объеме ЭМУ, состоящего из ТН, воздуха и продуктов испарения, а также площади массоотдающей поверхности испаряемой жидкости. Полученные результаты позволили определить на данном этапе исследований коэффициенты теплоотдачи от газа к жидкости и пластине, а также критериальные уравнения.

Выполнен сравнительный анализ полученного критериального уравнения для теплообмена при турбулентном обтекании поверхности пластины вынужденным потоком с известной зависимостью, в результате которого расхождение по числам Нуссельта составило 10 %.

Список литературы

1. Доклад секретариата. Меры, принимаемые космическими агентствами для снижения темпов образования космического мусора или его потенциальной опасности: доклад секретариата / Технический подкомитет ООН по использованию космического пространства в мирных целях, 13.12.1996. URL: http://www.unoosa.org/pdf/re-ports/ac105/AC105_663R.pdf (дата обращения: 18.07.2016).
2. Трушляков В.И., Куденцов В.Ю. Разработка активной бортовой системы увода средств выведения с орбит // Космонавтика и ракетостроение. 2009. Т. 57, № 4. С. 109–117.
3. Trushlyakov V.I., Kudentsov V., Lesnyak I., Rozhaeva K., Dron M., Zharikov K., Galfetti L. Gasification of liquid propellant residues in fuel tanks of upper stages to feed an onboard de-orbiting system // 6th European conf. for aeronautics and space sciences (EUCASS), Krakow, 2015.
4. Trushlyakov V.I., Kudentsov V.Yu., Lesnyak I.Yu., Lempert D.B., Zarko V.E. The modeling of unused propellant residues processes from a tank of rocket stage // Proc. of the 56th Israel Annual Conf. on Aerospace Sci. Tel-Aviv, Haifa, Israel. 2016. ThL1T4.4.
5. Трушляков В.И., Шалай В.В., Шатров Я.Т. Снижение техногенного воздействия ракетных средств выведения на жидких токсичных компонентах ракетного топлива на окружающую среду: монография / Омск: ОмГТУ, 2004. 220 с.
6. Trushlyakov V., Lavruk S. Theoretical and experimental investigations of interaction of hot gases with liquid in closed volume // Acta Astronautica. 2015. Vol. 109. P. 241–247.
7. Galfetti L., Paravan C., Misani R., Peri G., Sassi F., Colombo G., Trushlyakov V. Numerical and experimental analysis of kerosene evaporation for space debris applications // 4th European Workshop on Space Debris Modeling and Remediation, CNES, Paris, 6–8 June 2016.

8. Семенов А.А., Феоктистов Д.В., Зайцев Д.В., Кузнецов Г.В., Кабов О.А. Экспериментальное исследование испарения капли жидкости на нагреваемой твердой поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 6. С. 801–804.
9. Гагапова Е.Я., Филипенко Р.А., Люлин Ю.В., Граур И.А., Марчук И.В., Кабов О.А. Экспериментальное исследование температурного поля в двухслойной системе жидкость–газ // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 6. С. 729–734.
10. Кузнецов В.В. Тепломассообмен на поверхности раздела жидкость–пар // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 5. С. 97–107.
11. Kersey J., Loth E., Lankford D. Effect of evaporating droplets on shock waves // AIAA J. 2010. Vol. 48, No. 9. P. 1975–1986.
12. Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И., Путин Г.Ф., Соболева Е.Б. Конвективные движения околокритической жидкости в условиях реальной невесомости // Космические исследования. 2001. Т. 39, № 2. С. 188–200.
13. Gatapova E.Ya., Semenov A.A., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engng Aspects. 2014. Vol. 441. P. 776–785.
14. Любимова Т.П., Скуридин Р.В. Численное моделирование трехмерных нестационарных течений и тепло-массопереноса в цилиндрическом жидком мостике при отсутствии силы тяжести // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3, № 3. С. 77–89.
15. Богданов С.Н., Бучко Н.А., Гуйго Э.И. и др. Теоретические основы хладотехники. Тепломассообмен. М.: Агропромиздат, 1986. 320 с.
16. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. М.: ГЭИ, 1958. 418 с.
17. Михеев М.А., Михеев И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

*Статья поступила в редакцию 13 сентября 2016 г.,
после переработки — 14 февраля 2017 г.*