

УДК 538.975:53.082.53533.72:629.782

ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ ВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2023 г. А. А. Чиров¹, *, Н. Г. Белякова¹

¹Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*chiroff@mail.ru

Поступила в редакцию 12.02.2023 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2023 г.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований процессов выделения легко-конденсирующихся веществ из некоторых конструкционных материалов, применяемых на космических аппаратах, а также степень влияния тонких пленок конденсата на интегральные оптические коэффициенты внешних терморегулирующих покрытий (ТРП) КА. Исследования проводились в вакуумных условиях, эмитирующих космическую среду и излучение Солнца. Результаты экспериментов показали: плотности потоков компонент, выделяющихся с поверхностей материалов, достигают величин $5.4 \cdot 10^{-7}$ г см⁻² с⁻¹ и падают со временем по экспоненциальному закону; тонкие пленки конденсата толщиной 100 Å способны ухудшить интегральные оптические коэффициенты ТРП на десятки процентов. Обнаруженные эффекты способны влиять на тепловой баланс КА. Используемые в работе методы экспериментального исследования могут применяться для широкого класса материалов, а получаемые результаты использоваться при создании КА различного типа.

DOI: 10.31857/S0023420623600046, EDN: UMJEC

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие воздействия различных факторов космического пространства на КА, как с внешних поверхностей КА [1], так и из внутренних объемов приборных отсеков [2], происходит выделение различных веществ. Наряду с выбросом рабочего тела двигателями ориентации и стабилизации КА на орбите, все эти продукты образуют в некоторой окрестности КА так называемую собственную внешнюю атмосферу (СВА). Часть компонент СВА, составляющая единицы процентов, может вернуться и попасть на различные функционально важные поверхности КА, например, на поверхности солнечных батарей (СБ), внешние терморегулирующие покрытия (ТРП), оптические приборы.

Определенный интерес вызывают те компоненты, которые способны конденсироваться на внешних поверхностях КА, образовывать на них тонкие пленки и тем самым влиять на рабочие характеристики этих поверхностей. В ранее опубликованных работах [3, 4] были представлены результаты экспериментальных исследований в данном направлении для щелочных металлов, как рабочих тел электроракетных двигателей (ЭРД) космических аппаратов. Исследования показали

наличие существенного влияния тонких пленок конденсата металлического рабочего тела ЭРД на оптические характеристики функционально важных внешних поверхностей КА.

В развитие указанных работ в данной статье представлены:

1. Результаты экспериментального определения удельных потоков, конденсирующихся при умеренных температурах компонент, выделяющихся из ряда конструкционных материалов, находящихся как снаружи КА, так и внутри приборного контейнера открытого типа.

2. Результаты экспериментального определения влияния тонкой пленки конденсата продуктов выделения из ряда конструкционных материалов на интегральные оптические коэффициенты ТРП.

1. ПЛОТНОСТЬ ПОТОКОВ ПРОДУКТОВ ВЫДЕЛЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЕЙ НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В настоящем разделе представлены результаты экспериментального определения плотности по-

токов частиц ($G_{уд}$) компонент, выделяющихся из ряда материалов, которые способны конденсироваться при умеренных температурах на ТРП внешних поверхностей КА.

Выбор шести конструкционных материалов для исследований, представляющих практический интерес, был не случаен. Он осуществлен из большого числа образцов (порядка 25) на основании предварительных экспериментальных исследований. Эти эксперименты имели целью выявить материалы, выделяющиеся компоненты из которых наиболее существенно оказывали влияние на оптические свойства ТРП, в частности, на коэффициенты отражения светового излучения.

1.1. Экспериментальный метод определения $G_{уд}$

Эксперименты проводились в вакуумной камере из нержавеющей стали объемом 20 л, оборудованной безмасленными средствами откачки (гетероионным насосом ГИН-5), что позволяло получать разряжение в камере до 10^{-6} Торр. Схема экспериментального узла приведена на рис. 1. Образец исследуемого материала 2 укладывался в ванночку 3 из нержавеющей стали с размерами в плане 40×40 мм, которая нагревалась спиральным нагревателем 5. Температура нагрева материала 2 измерялась медь-константановой термопарой 4 и милливольтметром 6. На поворотной штанге крепился датчик 1 измерения потоков частиц. В качестве датчика использовался кварцевый резонатор. По временному изменению частоты Δf кварцевого резонатора на каждом промежутке по времени Δt определялась плотность потока конденсирующейся компоненты G_0 , которая в дальнейшем пересчитывалась в $G_{уд}$ по формуле:

$$G_{уд} = \frac{\pi R^2 G_0}{S_{обр}}, \quad (1)$$

где

$$G_0 = \frac{K \rho \Delta f}{f_0^2 \Delta t}. \quad (2)$$

Метод кварцевого резонатора (кварцевых весов) измерения потоков частиц рабочего тела неоднократно использовался авторами в работах [3, 4].

При проведении экспериментов значения параметров, входящих в соотношения (1), (2), были следующие: R – расстояние от поверхности образца до чувствительной пластины кварцевого резонатора, $R = 28$ см; $S_{обр} = 16$ см² – площадь поверхности материала исследуемого образца; $K = 167$ кГц см – постоянная кварцевого резонатора (срез кристалла АТ); $\rho = 2.65$ г см⁻³ – плотность пластины кварцевого резонатора; $f_0 = 10000$ кГц –

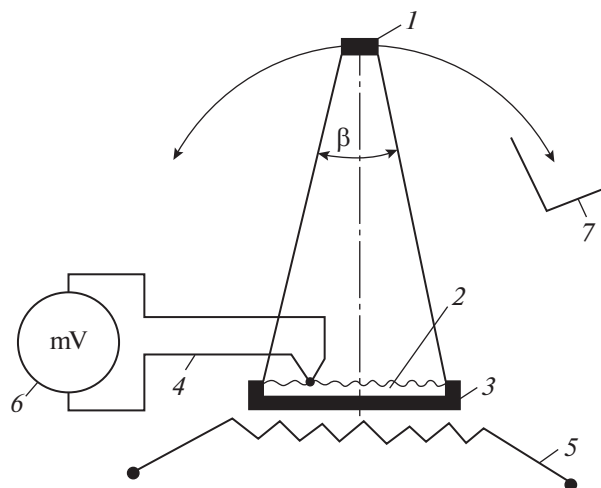


Рис. 1

опорная (начальная) частота кварцевого резонатора; Δf – итоговое изменение частоты (кГц) кварцевого резонатора за промежуток времени $\Delta t = 30$ с.

Представленные данные позволили получить простое соотношение для определения $G_{уд}$ по результатам измерений Δf :

$$G_{уд} = 2.269 \cdot 10^{-5} \Delta f \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1}. \quad (3)$$

Вывод соотношения (1) осуществлен при допущении, что распределение потоков частиц компонент по углу от нормали к поверхности образцов подчиняется закону косинуса [5].

На чувствительной поверхности кварцевого резонатора, находящегося в положении 1 (см. рис. 1), происходили два взаимно противоположных процесса: конденсация частиц веществ, выделяющихся с поверхности образца, и испарение (уход) этих частиц с поверхности кварцевого резонатора. Для выявления этих двух процессов проводились измерения при двух положениях кварцевого резонатора: в положении 1 и при повороте штанги с кварцевым резонатором в положение за экран 7, в котором происходит только процесс испарения конденсированных частиц.

Таким образом, величина Δf определялась как разность

$$\Delta f = \Delta f_1 - \Delta f_2, \quad (4)$$

где $\Delta f_1 > 0$ – изменение (падение) частоты кварцевого резонатора в положении 1 за период времени Δt ; $\Delta f_2 < 0$ – изменение (увеличение) частоты за период Δt при повороте штанги и расположении кварцевого резонатора за экраном 7. Для измерений частоты кварцевого резонатора использовался частотомер Ф30, с разрешающей способностью до 1 Гц.

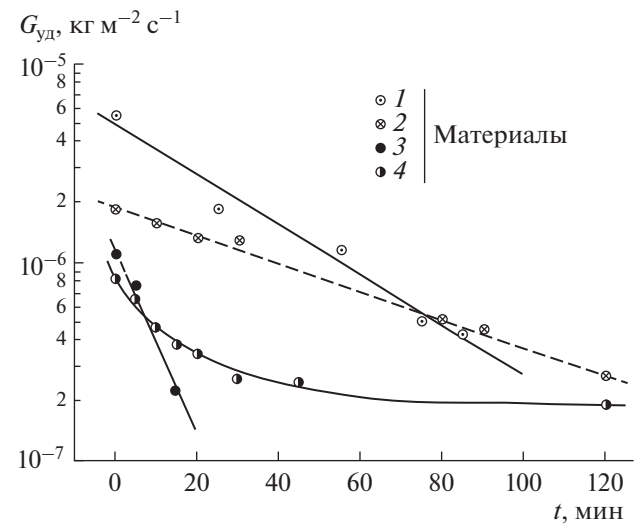


Рис. 2

Ввиду сложности измерения температуры чувствительной пластины кварцевого резонатора, с целью получения достоверной информации при измерениях $G_{уд}$, были проведены методические эксперименты. Проведены (см. рис. 1) измерения частоты кварцевого резонатора при различных температурах ванночки 3 без образцов 2. Методические эксперименты показали, что заметное влияние теплового излучения нагревателя образца на частоту, а следовательно, на температуру чувствительного элемента резонатора, происходит при температуре ванночки более 160°C (наибольшей температуре, реализуемой в основных экспериментах). Измерения показали, что даже при таком предельном значении температуры изменение частоты резонатора, по сравнению с частотой при комнатной температуре (~18°C), происходит не более чем на 20 Гц, что соответствует изменению температуры резонатора не более чем на несколько единиц градуса. Полученные результаты согласуются с температурно-частотными характеристиками кварцевых резонаторов среза АТ [6].

Таблица 1

Материал	1	2	3	4	5	6
$T_{пр}, ^\circ\text{C}$	65	65	300	—	—	—
$T_3, ^\circ\text{C}$	63–68	71–72	140–145	152–157	125–135	103
$G_{уд0}, \cdot 10^7, \text{г см}^{-2} \text{с}^{-1}$	5.4	1.87	1.11	0.84	0.24	0.25
$\tau, \cdot 10^{-3}, \text{с}$	2.06	3.72	0.772	1.287	—	—

1.2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Исследования временной зависимости $G_{уд}$ проводились в течение двух часов для каждого из шести отобранных материалов:

- 1) лента поливинилхлоридная электроизоляционная;
- 2) лента пластикатная крепежная;
- 3) клей К300-61 + стеклосетка, пропитанная клеем БФ-4;
- 4) батареи солнечные с покрытием каучука, без защитных стекол;
- 5) мат ЭВТИ — экранно-вакуумная теплоизоляция;
- 6) поролон дублированный ПЭТФ-ОА.

Результаты измерений для первых четырех образцов материалов, при близких значениях к предельным рабочим температурам T_3 , отражены на графиках (рис. 2). Из графиков видно, что величины $G_{уд}$ для всех образцов уменьшаются за период измерений более чем на порядок. Полученные зависимости описывается выражением (5) [7, 8]:

$$G_{уд} = G_{уд0} \exp(-t/\tau), \tag{5}$$

где τ — некоторая постоянная величина времени; t — время; $G_{уд0}$ — начальное значение $G_{уд}$.

Исходные температурные условия проведенных измерений и результаты статистической обработки для всех испытуемых образцов представлены в табл. 1, где $T_{пр}$ — предельно допустимая рабочая температура материала; T_3 — диапазон температур материалов, реализуемый при измерениях.

Значения τ , определенные в результате статистической обработки, позволяют экстраполировать полученные в экспериментах значения $G_{уд}$ на существенно большие временные промежутки.

Измерения показали, что у материала 4 величина $G_{уд}$ в течение одного часа выходит на стационарный уровень. Стабилизацией $G_{уд}$ со временем, по-видимому, обладают и другие материалы, но это происходит за больший период времени.

В процессе проведения экспериментальных исследований авторам не удалось выявить вре-

менного изменения $G_{уд}$ для материалов 5 и 6 в течение 2.5 ч. Это, возможно, является следствием недостаточно высокой чувствительности применяемого метода измерений, которая по оценкам составляла $\sim 4 \cdot 10^{-9} \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Для материала 2 была получена зависимость $G_{уд}(T)$ от температуры образца (рис. 3). Нагрев образца при данных измерениях осуществлялся за сравнительно короткое время (менее 10 мин), в результате чего процесс временного изменения $G_{уд}$ не успевал проявиться, и это дало возможность получить истинную картину зависимости $G_{уд}(T)$.

Статистическая обработка измерений показала, что зависимость $G_{уд}(T)$ описывается выражением (6) [7, 8]:

$$G_{уд}(T) = G_{уд0} \exp(-E/RT), \quad (6)$$

где $G_{уд0}$ — удельная плотность потока конденсирующейся компоненты, определенная при начальной температуре материала T_0 ; R — универсальная газовая постоянная; $E = 1.29 \cdot 10^{-8} \text{ Дж град}^{-1} \text{ К моль}^{-1}$ — некоторая энергия активации процесса на начальном участке измерений ($T = 65\text{--}74^\circ\text{C}$). Однако, при $T > 74^\circ\text{C}$ (превышающей $T_{пр}$), на графике $G_{уд}(T)$ (рис. 3) наблюдается излом. Это явление свидетельствует, по-видимому, о начале структурных изменений и начале выделения из материала 2 дополнительных компонент.

Представленные в данном разделе экспериментальные результаты получены в сравнительно малых временных и температурных диапазонах. Но используемая в работе экспериментальная методика измерений $G_{уд}$ и соотношения (5), (6) дают возможность значительно расширить диапазон применения полученных результатов.

2. ВЛИЯНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК КОНДЕНСАТА КОМПОНЕНТ, ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, НА ОПТИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ A_s И ε ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

В изложенном выше разделе приведены результаты исследований процессов выделения частиц легкоконденсирующихся компонент из некоторых конструкционных материалов. Потоки этих частиц являются составной частью СВА КА. Малая доля частиц СВА ($\leq 1\%$) может изменить направление движения и оказаться на поверхности КА.

При длительной эксплуатации КА на орбите, на ТРП и других функционально важных поверхностях могут образовываться тонкие пленки конденсата некоторых компонент СВА, которые, в свою очередь, могут изменить оптические свой-

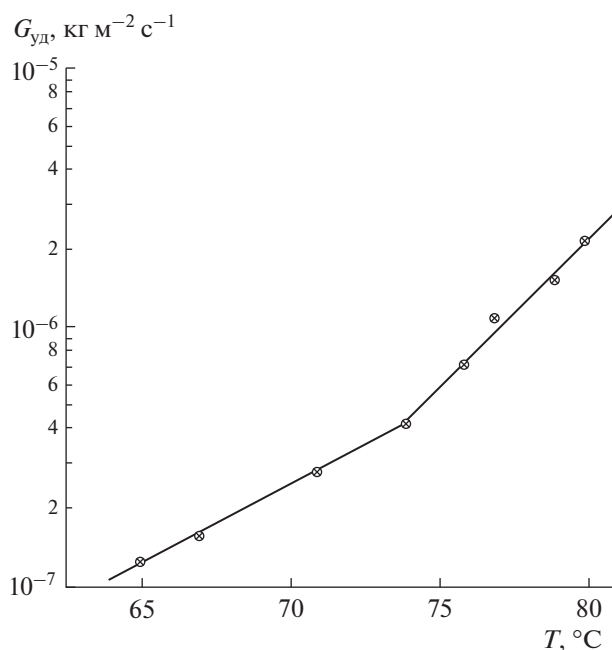


Рис. 3

ства ТРП: A_s — интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения, ε — интегральный коэффициент теплового излучения (степень черноты). Изменение оптических свойств, как правило в худшую сторону, приводит к нарушению теплового баланса КА.

Оценка степени изменения A_s и ε при осаждении на ТРП тонких пленок продуктов выделения из некоторых конструктивных материалов явилось основанием для проведения нижеописанных экспериментальных исследований.

2.1. Экспериментальный метод определения A_s и ε

Теоретические основы метода измерений A_s и ε поверхностей ТРП и экспериментальный стенд подробно изложены в работе [3]. Метод измерений основан на использовании тонких металлических моделей (пластин), предполагаемых изотермическими. Пластины помещаются в вакуумную камеру в условия, исключающие какой-либо теплообмен с окружающей средой кроме лучистого. Одна из поверхностей металлической пластины с исследуемым покрытием ТРП подвергается воздействию постоянного светового излучения от внешнего источника, имитирующего Солнце. При установлении равновесной температуры T_0 пластины производится периодическое изменение интенсивности падающего излучения по синусоидальному закону. После истечения некоторого времени переходного процесса ($\approx 20\text{--}30$ мин), температура пластины приобретает синусоидаль-

ную составляющую с той же частотой, что и световое излучение.

Соотношения, по которым на основании измерений соответствующих параметров вычисляются оптические коэффициенты поверхностей пластины A_s и ϵ , получены из рассмотрения решения уравнения теплового баланса тонкой металлической пластины.

$$\rho C_p \delta \frac{dT}{dt} = A_{sn} J(t) + q - (\epsilon_n + \epsilon) \sigma T^4, \quad (7)$$

где: ρ — плотность материала пластины; C_p — удельная теплоемкость материала пластины; δ — толщина пластины; q — фоновые тепловые потоки, поглощаемые пластиной; σ — постоянная Стефана—Больцмана; A_{sn} — интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения поверхности металлической пластины с ТРП (коэффициент поглощения); ϵ — интегральный коэффициент теплового излучения (степень черноты) неосвещенной стороны пластины; ϵ_n — интегральный коэффициент теплового излучения ТРП с освещенной стороны пластины; T — температура пластины; $J(t) = J_0 (1 + k \sin \omega t)$ — плотность падающего на поверхность пластины излучения от имитатора Солнца; t — время; J_0 — некоторая средняя постоянная величина интенсивности излучения, при которой пластина приобретает равновесную температуру T_0 ; k — коэффициент модуляции интенсивности излучения от имитатора Солнца; ω — круговая частота изменения излучения.

Предполагается, что все физические параметры пластины — ρ , δ , C_p , q , A_s и ϵ , являются постоянными величинами. Такое допущение справедливо даже в сравнительно широком температурном диапазоне пластины.

Теплофизические параметры ρ и C_p образцов реальных материалов, например пластин, покрытых различными ТРП, как правило, неизвестны и это ограничивает возможности рассмотренного метода. Поэтому был использован метод определения относительного изменения A_s и ϵ ТРП, то есть до и после каких-либо воздействий на поверхность (в частности, напыления на поверхность тонких пленок).

Вначале проводились измерения для “чистого” образца, а затем осуществлялись измерения для того же образца, но после конденсации какого-либо вещества на поверхность ТРП. Причем необходимо, чтобы после воздействия на поверхность исследуемого образца ТРП параметры ρ , δ и C_p не менялись, или менялись незначительно. По сделанным оценкам это допустимо при напылении тонких пленок различных веществ толщиной до нескольких тысяч ангстрем.

При выполнении выше сделанных допущениях, были выведены соотношения (8) и (9), по ко-

торым и были рассчитаны относительные изменения A_s и ϵ ТРП.

$$\frac{A_{sn}}{A_s} = \gamma \frac{A_n \operatorname{cosec} \varphi_n}{A \operatorname{cosec} \varphi}, \quad (8)$$

$$\frac{\epsilon_{1n} + \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} = \frac{T_0^3 \operatorname{tg} \varphi}{T_{0n}^3 \operatorname{tg} \varphi_n}, \quad (9)$$

где A_s и A_{sn} — коэффициенты поглощения; A и A_n — амплитудные значения синусоидального изменения температуры соответственно “чистого” и напыленного образца ТРП; φ и φ_n — углы сдвига фаз между синусоидальными изменениями светового потока от имитатора Солнца и температуры соответственно “чистого” и напыленного образца; ϵ_1 и ϵ_{1n} — коэффициенты излучения соответственно “чистого” и напыленного образца ТРП; ϵ_2 — коэффициент излучения необлучаемой стороны образца; T_0 и T_{0n} — средние (равновесные) температуры соответственно “чистого” и напыленного образца.

Из выражений (8) и (9) следует, что для одного и того же образца ТРП относительное изменение величин A_s и ϵ можно определить, измерив параметры T_0 , A и φ до и после напыления. При этом должны оставаться неизменными параметры J_0 , ω и k . Если равенство $J_0 = J_{0n}$ в эксперименте не выполняется, то в выражении (8) необходимо ввести коэффициент $\gamma = J_0/J_{0n}$.

Если исходно A_s , ϵ_1 для “чистого” образца ТРП и ϵ_2 известны, или определены заранее каким-либо другим способом, то из выражений (8) и (9) вычисляются абсолютные значения A_{sn} и ϵ_n .

2.2. Результаты экспериментов и их обсуждение

С использованием вышеописанного метода измерений были проведены экспериментальные исследования влияния тонких пленок конденсата веществ, выделяющихся из конструкционных материалов и представленных в подразд. 1.2 на интегральные оптические коэффициенты A_s и ϵ ТРП В16 и ОСОС.

Покрытие В16 представляет собой белую эмаль, созданную на основе окиси цинка, ОСОС — солнечные отражатели — тонкие (~0.2 мм) пластины из кварцевого стекла с напылением Ag или Al с одной стороны. Каждый тип ТРП наносился на алюминиевую пластину толщиной 1.5 мм и 40 × 40 мм в плане.

Образцы с соответствующим ТРП крепились на поворотном механизме, который размещался в вакуумной камере с замкнутым экраном, охлаждаемым жидким азотом [3]. В замкнутом экране имелось отверстие для освещения образца имитатором Солнца. При вертикальном положении об-

Таблица 2

Конструкционные материалы	ТРП	T_0 , К	ϵ_{ln}/ϵ_1	A_{sn}/A_s
Лента поливинил-хлоридная изоляционная	B16	237	0.66	1.12
	OCOC	234	0.30	1.51
Лента пластикатная крепежная	B16	244	0.68	0.98
	OCOC	224	1.05	0.95
Клей К300-61	B16	238	0.45	0.97
	OCOC	238	0.336	0.96

разца осуществлялись соответствующие измерения, а при горизонтальном — напыление на поверхность ТРП конденсирующихся компонент.

Напыление осуществлялось с помощью специального испарителя диаметром 30 мм, в который помещался конструкционный материал в измельченном виде. Испаритель нагревался до предельно допустимой рабочей температуры соответствующего материала. На образцы ТРП осуществлялось нанесение тонких пленок плотностью $\sim 0.5 \cdot 10^{-6}$ г см $^{-2}$, что соответствует, при условной объемной плотности пленки напыления 0.5 г см $^{-3}$, толщине пленки напыления ~ 100 Å.

Полученные результаты измерений представлены в табл. 2, в которой даны отношения ϵ_{ln}/ϵ_1 и A_{sn}/A_s , характеризующие степень изменения соответствующих интегральных оптических коэффициентов при нанесении на поверхности ТРП тонких пленок по сравнению с “чистыми”. Также в таблице даны значения равновесных температур T_0 пластин образцов ТРП, при которых проводились измерения.

Как следует из полученных экспериментальных результатов, значительное снижение своих величин претерпел коэффициент излучения ϵ . Исключением является случай осаждения на образец OCOC конденсата, выделяющегося из материала “лента пластикатная крепежная”, где в пределах точности измерений (3–5%) изменений величины ϵ не произошло. Иная картина наблюдается для коэффициентов A_s образцов ТРП. Существенное увеличение A_s произошло у обоих типов образцов при осаждении на их поверхности конденсата только от материала “лента поливинилхлоридная электроизоляционная”, в остальных ситуациях, в пределах точности измерений (3–5%), A_s не изменился.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Простота и высокая чувствительность экспериментального метода определения потоков частиц компонент (составляющих СВА), выделяющихся из исследуемых конструкционных мате-

риалов, дает возможность использовать этот метод измерений для исследования широкого класса материалов, применяемых на КА.

Измерения $G_{уд}$ проводились в сравнительно узком временном диапазоне и температурном промежутке. Использование соответствующих физических моделей (5) и (6), позволяют экстраполировать полученные значения $G_{уд} = 5.4 \cdot 10^{-6} \dots 2.5 \cdot 10^{-7}$ кг м $^{-2}$ с $^{-1}$ на значительные промежутки времени и широкий диапазон (в пределах рабочих) температур исследуемых материалов.

2. Несмотря на значительную продолжительность (~ 2 ч) измерений интегральных оптических коэффициентов A_s и ϵ ТРП и невысокую точность, используемая методика регулярного теплового режима тонкой металлической пластины, имеет существенные достоинства по сравнению с другими существующими методами измерений A_s и ϵ плоских поверхностей. Это — возможность одновременно, в одном эксперименте, определять A_s и ϵ ; условия проведения измерений приближены к натурной космической среде. Вакуумная камера откачивалась безмасленными средствами откачки до давления $\sim 10^{-6}$ Торр, в качестве имитатора Солнца использовалась газоразрядная ксеноновая лампа высокого давления, имеющая спектр излучения, близкий к солнечному.

Полученные результаты экспериментальных исследований показали: тонкие пленки ~ 100 Å легкоконденсирующихся компонент, выделяющиеся из некоторых конструкционных материалов КА, способны в некоторых ситуациях изменить в худшую сторону интегральные оптические коэффициенты ТРП на десятки процентов. Это явление может привести к нарушению теплового баланса некоторых систем КА.

Таким образом, реализуемые в работе экспериментальные методы определения $G_{уд}$ и изменения A_s и ϵ применимы к широкому классу материалов ТРП и конструкционных материалов КА. Результаты проведенных исследований могут использоваться при создании КА на стадии их проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротеев А.С., Акимов В.Н.* Перспективы развития космоса // Полет. 2003. № 12. С. 3–12.
2. *Чиров А.А., Белякова Н.Г.* Физико-математическая модель динамики давления остаточного газа внутри негерметичного приборного отсека высокоорбитального КА // Космические исследования. 2022. Т. 60. № 4. С. 348–354. <https://doi.org/10.31857/S0023420622040033>
3. *Чиров А.А.* Влияние тонких пленок конденсата металлического рабочего тела ЭРД на интегральные оптические коэффициенты терморегулирующих покрытий космических аппаратов // Космические исследования. 2014. Т. 52. № 3. С. 248–256. <https://doi.org/10.7868/S0023420614030030>
4. *Чиров А.А., Белякова Н.Г.* Изменение прозрачности тонких пленок цезия на поверхности стекла оптических приборов космического аппарата // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 12. С. 98–103. <https://doi.org/10.7868/S0207352813120056>
5. *Кошмаров Ю.А., Рыжов Ю.А.* Прикладная динамика разреженного газа. М.: Машиностроение, 1977. 184 с.
6. *Альтиуллер Г.Б.* Кварцевая стабилизация частоты. М.: Связь, 1977. 272 с.
7. *Попов Ю.А. и др.* Кинетика газовыделения летучих конденсирующихся веществ из органических материалов при длительном термовакuumном воздействии // Сб. тр. 8-й Всесоюзной конференции по динамике разреженных газов. Москва, 24–26 сентября 1985.
8. *Костюк В.И., Хасанишин Р.Х.* К вопросу моделирования газовыделения материалами покрытий КА при термовакuumном воздействии // Космонавтика и ракетостроение. 2002. Т. 28. № 3. С. 155–163.