

УДК 539.219.1+620.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОСАЖДЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ

© 2014 С. В. Цаплин, С. А. Большев

Самарский государственный университет

Работа посвящена исследованию конструкционных неметаллических материалов, применяемых при создании космических аппаратов, на газовыделение и потерю массы при термовакуумном воздействии, а также исследованию динамики осаждения продуктов газовой выделенной на оптические поверхности оптической аппаратуры. Для проведения исследований разработан стенд по изучению динамики осаждения конденсированных продуктов на основе кварцевых микровесов. В соответствии с ГОСТ Р 50109-92 проведены испытания на потерю массы и газовой выделение ряда конструкционных неметаллических материалов, используемых в составе космического аппарата: стеклотекстолит, стеклотекстолитовая панель, пенополиуретан, ленты, ткани, клеи и др. Определено влияние осаждения конденсированных продуктов газовой выделенной от этих материалов на коэффициент пропускания оптического элемента. Дано заключение о возможности использования данных материалов в составе космического аппарата.

Кварц, микровесы, газовой выделение, осаждение, летучие конденсированные вещества.

Введение

При создании оптической спец аппаратуры космического аппарата, предназначенной для дистанционного зондирования Земли и работающей в мультиспектральном, панхроматическом или гиперспектральном режимах, выбор неметаллических конструкционных материалов следует осуществлять в соответствии с требованиями к газовой выделению материалов: общая потеря массы материала не более 1,0 %; содержание летучих конденсирующихся веществ (ЛКВ) не более 0,1 % при вакуумно-тепловом воздействии [1, 2]. Поэтому уже на этапах проектирования космического аппарата проводятся исследования конструкционных неметаллических материалов на газовой выделение, потерю массы и динамику конденсации продуктов газовой выделенной [3].

Существующая методика ускоренных испытаний [1, 2] позволяет определить потерю массы и ЛКВ исследуемого материала путём взвешивания конденсационной пластины на аналитических весах. Недостатком этой методики является то, что аналитические весы серии ВЛ, Precisa Ep, Precisa ES позволяют измерять массу с точностью 0,001 г, а весы серии ВМ – 1 мкг и, кроме того, отсутствует

возможность исследовать динамику роста массы и толщины конденсированной плёнки. Такие недостатки отсутствуют у кварцевых микровесов, в основе работы которых используется явление обратного пьезоэффекта кварцевой пластины [3 – 7]. Суть этого явления заключается в следующем: при осаждении вещества на поверхности кварцевой пластины происходит изменение резонансной частоты пластины, на основании которого рассчитывается масса конденсированных продуктов вещества с помощью уравнения Сауэрбрея [8]

$$\Delta m = - \frac{\Delta f (\rho_k \mu_k)^{\frac{1}{2}}}{2 f_0^2}, \quad (1)$$

где Δf – изменение резонансной частоты; f_0 – резонансная частота пьезокристалла; ρ_k – плотность кварца; μ_k – модуль упругости кварца. Поскольку площадь S адсорбции конденсированных продуктов определяется геометрическими размерами диафрагмы измерительной системы, то можно определить массу и в соответствии с (1) записать [9]

$$\Delta m = - \frac{\Delta f (\rho_k \mu_k)^{\frac{1}{2}}}{2 f_0^2} S, \quad (2)$$

В соответствии с [10] и (2) определим динамику изменения массы конденсированных продуктов следующим образом

$$\Delta m(t) = -\frac{\Delta f (\rho_k \mu_k)^{\frac{1}{2}}}{2f_0^2} S \cdot n(t), \quad (3)$$

где $n(t)$ – степень покрытия поверхности S конденсированными продуктами. Отсюда следует, что масса конденсированных продуктов пропорциональна изменению резонансной частоты. Обычно динамика осаждения конденсированных продуктов измеряется в течение длительного времени (порядка нескольких суток). Поэтому необходимо обеспечить температурную стабилизацию опорного кварца и измерительных кварцевых датчиков, чтобы тепловой дрейф частоты кварцев был минимальным [8, 11, 12]. В связи с этим возникают жесткие требования по стабильности температуры $\pm 1^\circ\text{C}$ и стабильности частоты опорного генератора 10^{-7} Гц. При таких условиях разрешающая способность по массе составляет $1.4 \cdot 10^{-9}$ г. [9].

Исследование осаждения конденсированных продуктов

В лаборатории «Взаимодействие излучения с веществом» Самарского государственного университета создан автоматизированный стенд, позволяющий проводить исследования неметаллических материалов на газовыделение, потерю массы и динамику конденсации продуктов газовой выделенной. Особенностью стенда является то, что в качестве датчиков используются кварцевые пластины с АЕ-срезом, с резонансными частотами от 2 до 8 МГц. Количество осевших на конденсационные пластины летучих конденсируемых веществ контролируется кварцевыми микровесами [9]. Принцип работы кварцевых микровесов [8,11,12] основан на том факте, что кварцевые пластины обладают частотной чувствительностью к изменению массы её электродов. Резонаторы включены в автоколебательную схему, частота колебаний измеряется частотомером Pen-

dulum CNT-66 [9]. Исследования проводятся в вакуумном универсальном poste ВУП-4 с рабочим объёмом 15 литров. Вакуум в рабочем объёме контролируется ионизационно-термопарным вакуумметром ВИТ-2, предназначенным для измерения остаточного давления в диапазоне от 20 до $1 \cdot 10^{-5}$ Па ($2 \cdot 10^{-1} - 10^{-7}$ мм. рт. ст.). Первая ступень откачки осуществляется форвакуумным насосом 2НВР-5Д с азотной ловушкой, вторая ступень — паромасляным насосом Н-0,5. Исследуемые конструкционные материалы помещаются в контейнеры, температура которых поддерживается терморегулятором температуры ТРМ 38-04 с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ в диапазоне от 0 до 250°C . Температура образцов, находящихся в контейнерах, контролируется хромель-копелевой термопарой. Частотомер Pendulum CNT-66 подключён к ЭВМ посредством приборного интерфейса КОП [9, 12], ГОСТ 26003-80 [13]. Управление частотомером, сбор, обработка и хранение результатов измерения осуществляется автоматически программными средствами, что позволяет производить до четырёх замеров частоты (присоединённой массы) в минуту. После проведения исследований динамики осаждения конденсированных продуктов определяется изменение массы образца и конденсационной пластины (кварцевого резонатора). Предельная масса осаждения измеряется с помощью аналитических весов ВЛР-20. Перед исследованием контейнеры с образцами материалов взвешиваются и помещаются в эксикатор с силикагелем для кондиционирования образцов, где выдерживаются двое суток при комнатной температуре.

Автоматизированный стенд позволяет проводить испытания длительностью до 300 часов. Процесс сбора результатов измерений, обработки, контроля температуры, давления, частоты, массы конденсированных продуктов и управление стендом осуществляется с помощью программы в среде LabVIEW (рис. 1). Калибровка датчиков температуры осуществляется в термостате Julabo с точностью

$\pm 0,01^\circ\text{C}$. На рис. 2 изображено устройство исследования динамики конденсированных продуктов, соответствующее ГОСТ Р 50109-92, в рабочем объеме ВУП-4. Устройство состоит из медного блока 1, к геометрическому центру которого прикреплена хромель-копелевая термопара 5, её выводы подключены к терморегулятору через электрические вакуумные вводы. Под медным блоком находится омический нагреватель – галогенная электролампа. В медный блок устанавливаются три изотермических контейнера с образцами. Над контейнерами установлены охлаждаемые держатели 2 пьезорезонансных датчиков массы 4, во внутренние полости охлаждаемых держателей посредством трубок 3 поступает охлаждающая жидкость (дистиллированная вода) из термостата.

В держателях кварцевых резонаторов 4 размещаются измерительные кварцевые резонаторы типа РК374 МД-6НК с резонансными частотами 4000000 Гц, 4194000 Гц, 8000000 Гц, 8388000 Гц. Непосредственно перед началом эксперимента измеряется начальная частота колебаний нового резонатора, затем с него удаляется крышка, и он устанавливается в держатель 4. Во избежание взаимного влияния автогенераторов и помех по цепям питания питание автогенераторов осуществляется от гальванических элементов.

Материалы и геометрические размеры испытательного стенда соответствуют требованиям ОСТ 92-9566-82. Ввиду того, что ОСТ 92-9566-82 требует, чтобы диаметр конденсационной пластины составлял 33 мм, а диаметры кварцевых резонаторов, использованных при испытаниях, составляют от 4,5 до 7,2 мм, то для интерпретации данных кварцевых микровесов необходимо знать зависимость толщины осаждённой плёнки от расстояния до центра стекла. Такие исследования были проведены на микрофотометре МФ-2. При этом снималась зависимость коэффициента поглощения плёнки в зависимости от расстояния до центра стекла. Замеры производились через

0,5 мм с поворотом стекла на 30° после каждого прохода. Нормированный и усреднённый по результатам семи замеров профиль пленки равномерный. Коэффициент поглощения плёнки не меняется.

В результате исследований было установлено: минимальная определяемая масса конденсированных продуктов — $1,4 \cdot 10^{-9}$ г при чувствительности $1 \cdot 10^{-10}$ г/Гц; температура кварцевых резонаторов стабилизировалась ультратермостатом U-10 с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$; для расчёта конденсированной массы в соответствии с уравнением Сауэрбрея определялась резонансная частота частотомером Pendulum CNT-66 при доверительной вероятности 2σ (95%) $< 2 \cdot 10^{-7}$ в области температур от 20 до 26°C ; с увеличением массы конденсированных продуктов на пьезорезонансной пластине чувствительность кварца уменьшалась. Была измерена предельная масса конденсированных плёнок. Она составила $3 \cdot 10^{-4}$ г. Увеличение на несколько градусов Цельсия температуры кварцевой пластины приводит к сдвигу частоты от 10 до 100 Гц, что равносильно изменению чувствительности по массе от 10^{-7} до 10^{-8} г/см².

Для устранения изменения чувствительности кварцевой пластины применялась система стабилизации температурного режима с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ с помощью охлаждения проточной водой [5]. Поскольку изменение частоты кварцевой пластины является функцией её температуры [6], то для компенсации температурного ухода частоты измерительного датчика (кварцевой пластины) в рабочем объёме в непосредственной близости помещается эталонный кварц, который защищён от конденсирующихся веществ. При этом измерительный и эталонный кварцы находились в одинаковых температурных условиях, температура которых поддерживалась в течение всего периода измерений конденсированной массы с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

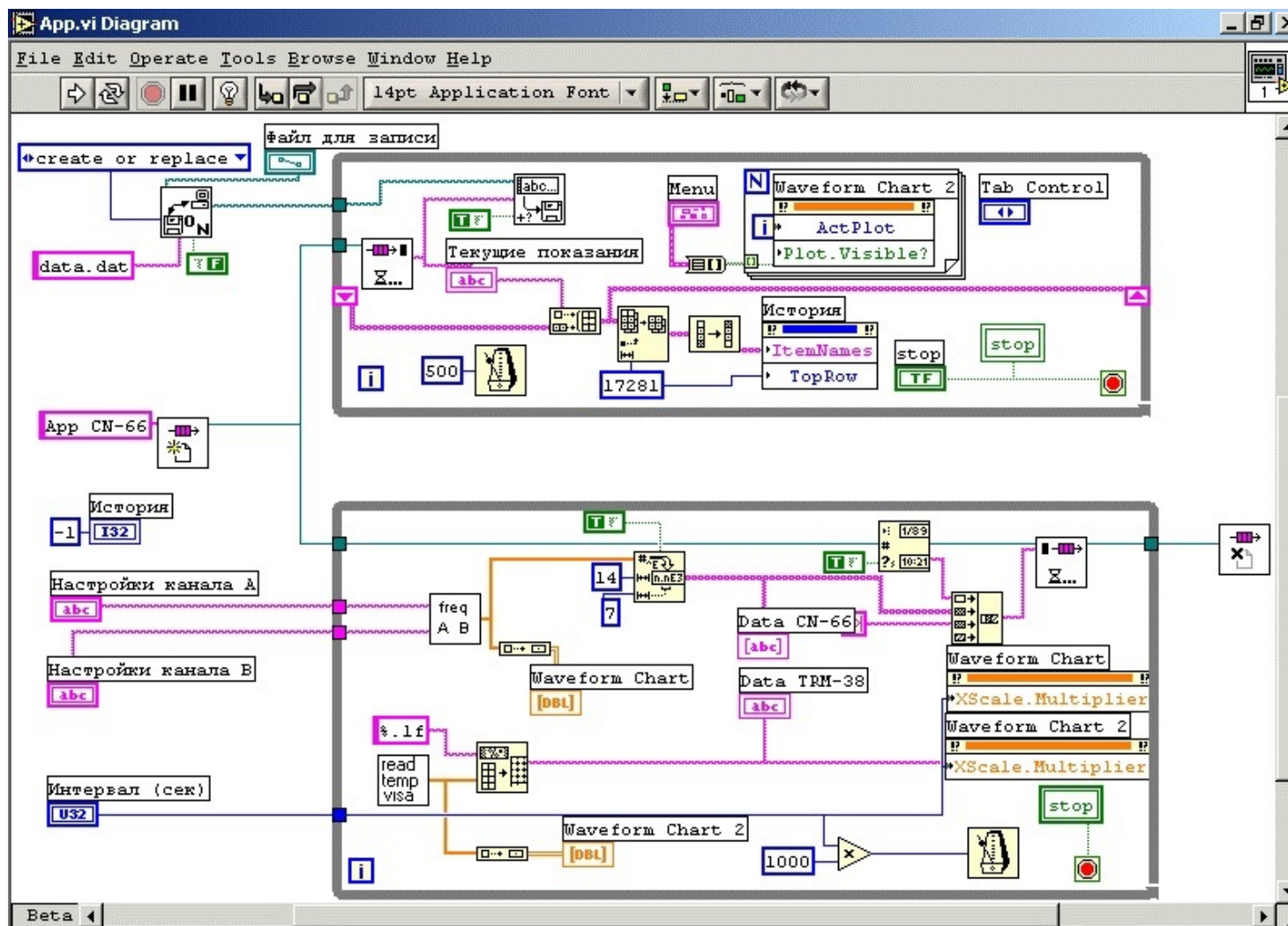


Рис. 1. Программа измерений, обработки и контроля температуры, давления, частоты колебаний, массы конденсированных продуктов



Рис. 2. Устройство исследования динамики конденсированных продуктов:
 1 – блок медный; 2 – охлаждаемые держатели пьезорезонансных датчиков;
 3 – трубки подвода охлаждающей жидкости; 4 – пьезорезонансный датчик массы;
 5 – хромель-копелевая термопара в керамическом изоляторе

Исследования материалов

В соответствии с ГОСТом Р 50109-92 (ОСТ 92-9566-82) были проведены исследования различных материалов:

- нить 3К ОСТ 17-330-84;
- пенополиуретан ППУ-35-0.8 ТУ 6-55-44-90;
- стеклотекстолит АФ10ВП1Ф 624.000.- ОТУ 32;
- стеклопластик АФ10ВО ОСТ 92-0956-74;
- стеклосотовая панель ССП-1Э ТУ6-19-95-78;
- лента склеивающая ЛТ-19 ТУ-17-626-79;
- лента ЛСОН-сотб ТУ5952-001-17547599-94;
- клей 88СА-ТУ38-101760-89;
- ЭВТИ ВВ-30 3539.4641-002;

- ткань ТСОН-СОТ ТУ5952-001-17547599-94;
- ткань ТСОН-ИП-С ТУ5952-001-17547599-94;
- теплозвукоизоляционный материал АТМ-3 ТУ205РСФСР16.751-87;
- ткань плащевая ГОСТ 28486-90;
- лента ЛВ-40 ГОСТ 17617-72;
- смазка ЦИАТИМ-221 ГОСТ 9433-80;
- клей К-300-61.

Результаты исследований стеклотекстолита, стеклосотовой панели на общую потерю массы и содержание ЛКВ приведены в табл. 1–3 и на рис. 3–11. Во всех измерениях температура контейнеров с образцами поддерживалась 125⁰С с точностью ±0,5°С.

Таблица 1. Результаты исследований стеклотекстолита АФ10ВП1Ф 624.000.- ОТУ 32

Контейнер	№4	№5	№6
Масса образца, г	0,48385	0,37175	0,540175
Масса контейнера с образцом до испытания, г	48,749	47,63955	47,3248
Масса контейнера с образцом после испытания, г	48,743	47,6343	47,31905
Потеря массы, г	0,006	0,00525	0,00575
Относительная потеря массы, %	1,24	1,41	1,069
Вакуум, мм. рт. ст.	$<1,5 \cdot 10^{-6}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$
Температура нагрева образцов, °С	125	125	125
Температура кварцевых резонаторов, °С	25	25	25
Масса ЛКВ, мкг	63,9	55,6	61,4
Продолжительность испытания, мин.	2800	2800	2800
Характер налёта	Слабозаметный глазом	Слабозаметный глазом	Слабозаметный глазом

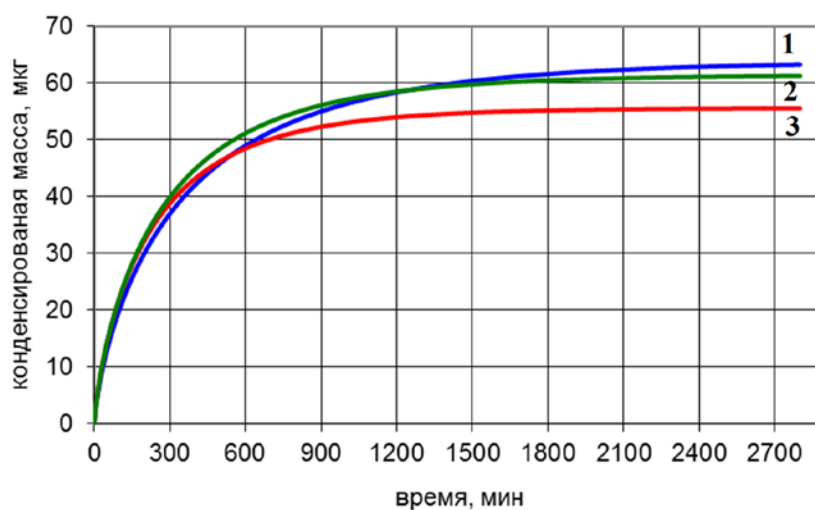


Рис. 3. Динамика осаждения конденсированных продуктов от образца стеклотекстолита АФ10ВП1Ф 624. 000.- ОТУ (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

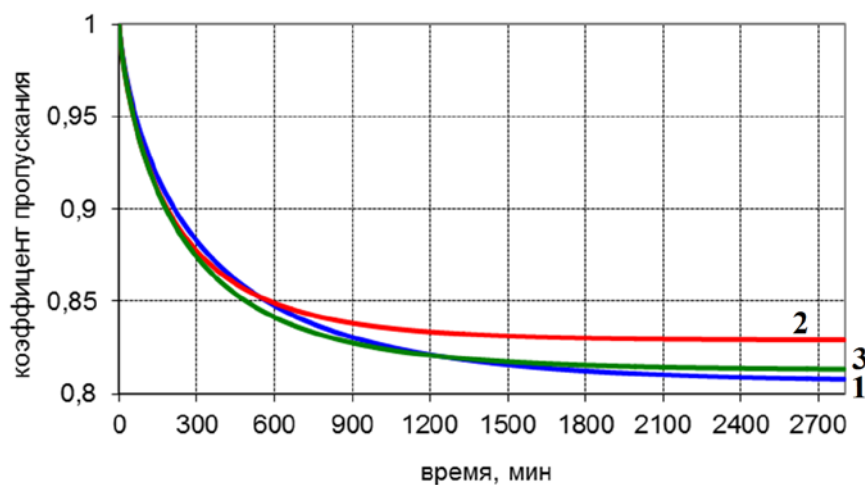


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осаждёнными конденсированными продуктами от образца стеклотекстолита АФ10ВП1Ф 624. 000.- ОТУ 32 во времени на длине волны 500 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

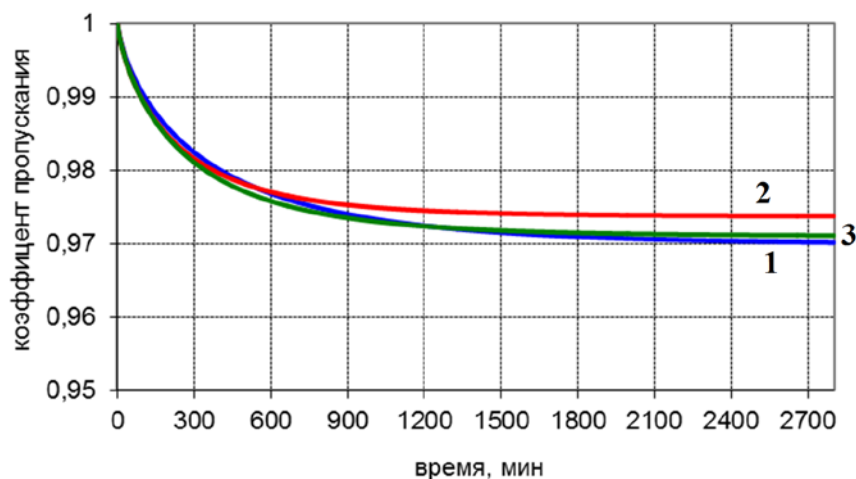


Рис. 5. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осажденными конденсированными продуктами от образца стеклотекстолита АФ10ВП1Ф 624. 000.- ОТУ 32 во времени на длине волны 700 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

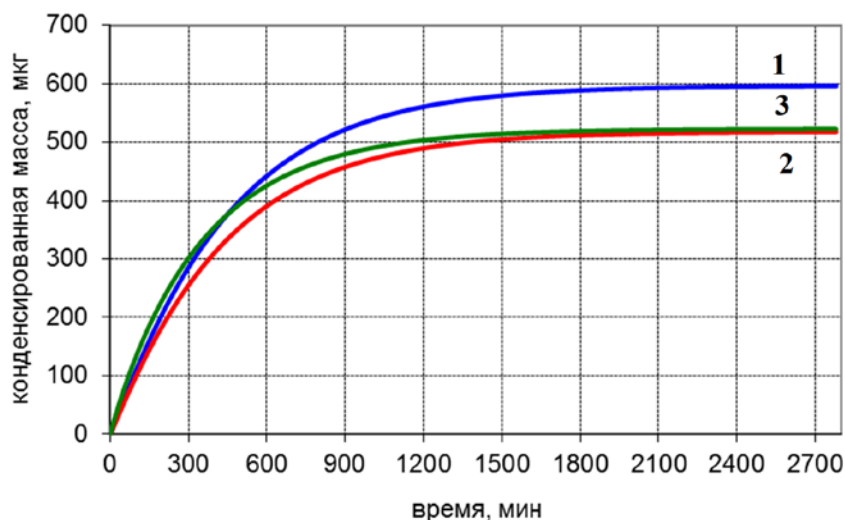


Рис. 6. Динамика осаждения конденсированных продуктов от образца стеклотекстолитовых панелей ССП-1Э Т96-19-95-78 (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

Таблица 2. Результаты исследований образцов стеклотекстолитовых панелей ССП-1Э Т96-19-95-78

Контейнер	№4	№5	№6
Масса образца, г	0,45825	0,3692	0,4218
Масса контейнера с образцом до испытания, г	48,72245	47,63595	47,2055
Масса контейнера с образцом после испытания, г	48,7194	47,633375	47,2029
Потеря массы, г	0,00305	0,002575	0,0026
Относительная потеря массы, %	0,665	0,697	0,616
Вакуум, мм. рт. ст.	$<1,5 \cdot 10^{-6}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$
Температура нагрева образцов, °С	125	125	125
Температура кварцевых резонаторов, °С	25	25	25
Масса ЛКВ, мкг	596	518	523
Продолжительность испытания, мин.	2780	2780	2780
Характер налёта	Белёсый	Белёсый	Белёсый

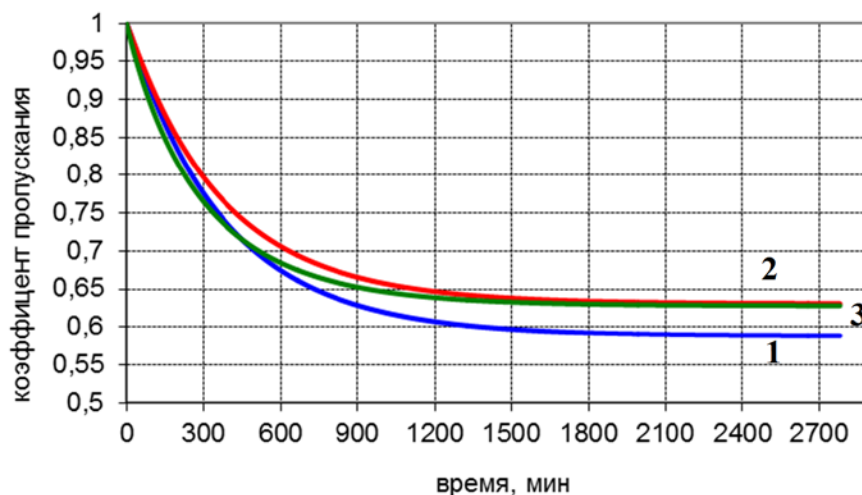


Рис. 7. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осаждёнными конденсированными продуктами от образца стеклотовой панели ССП-1Э Т96-19-95-78 во времени на длине волны 500 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

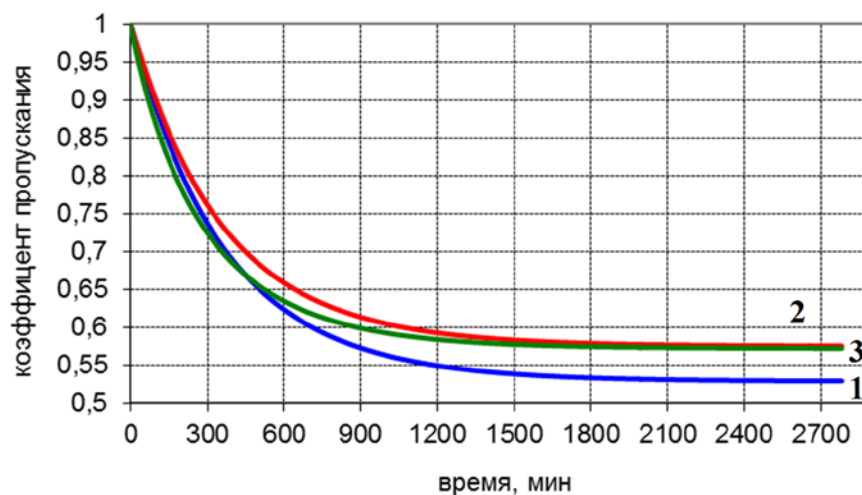


Рис. 8. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осаждёнными конденсированными продуктами от образца стеклотовой панели ССП-1Э Т96-19-95-78 во времени на длине волны 700 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

Таблица 3. Результаты испытаний образцов клея К-300-61

Контейнер	№1	№2
Масса образца, г	0,3241	0,2025
Масса контейнера с образцом до испытания, г	48,3450	46,9057
Масса контейнера с образцом после испытания, г	48,3428	46,9038
Потеря массы, г	0,0022	0,0019
Относительная потеря массы, %	0,672	0,954
Вакуум, мм. рт. ст.	$<1,5 \cdot 10^{-6}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$
Температура нагрева образцов, °С	125	125
Температура кварцевых резонаторов, °С	25	25
Масса ЛКВ, мкг	34,89	31,74
Продолжительность испытания, мин.	2600	2600
Характер налёта	Незаметный глазом	Незаметный глазом

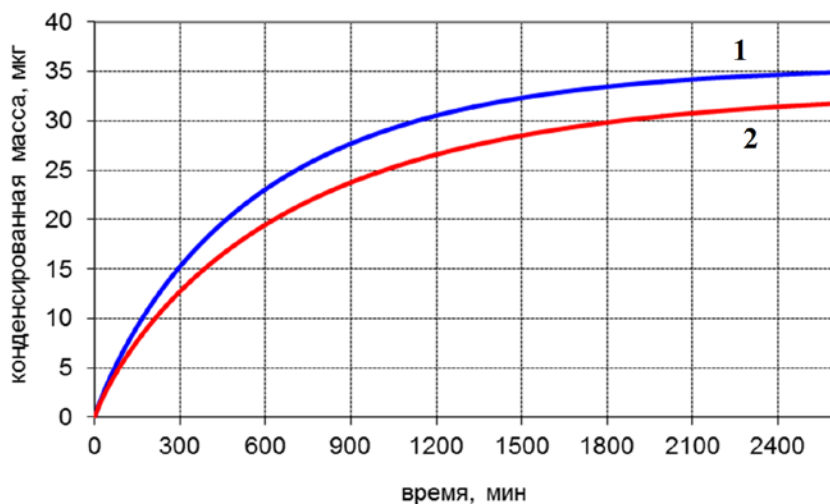


Рис. 9. Динамика конденсированных продуктов от образца клея К-300-61 (1 – образец №1, 2 – образец №2)

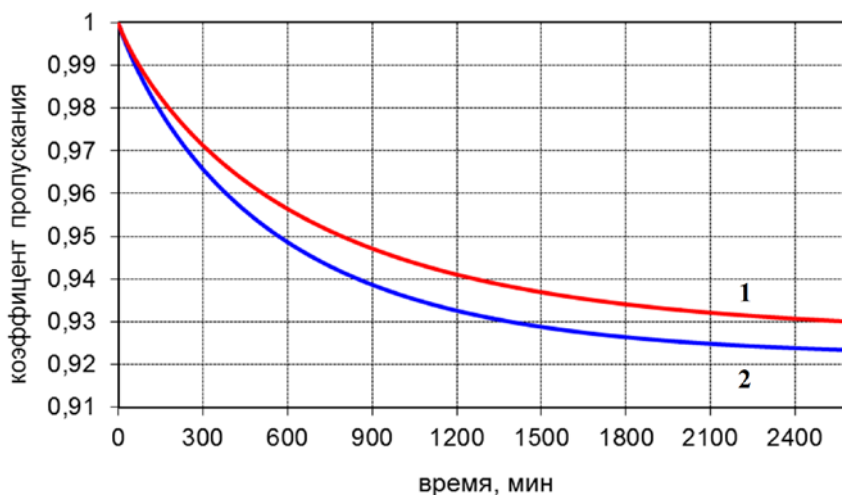


Рис. 10. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осажждёнными конденсированными продуктами от образца клея К-300-61 во времени на длине волны 500 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2)

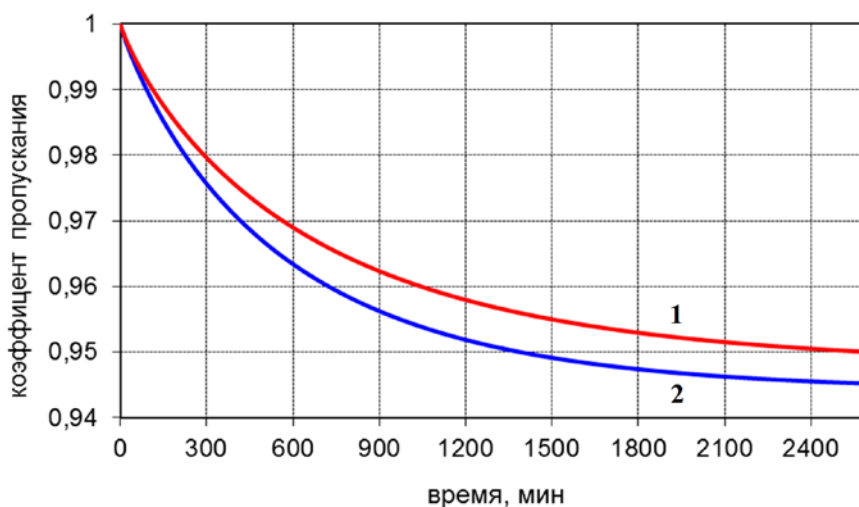


Рис. 11. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осажждёнными конденсированными продуктами от образца клея К-300-61 во времени на длине волны 700 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2)

Заключение

На основании проведённых испытаний материалов на потерю массы и содержание ЛКВ при термовакуумном воздействии можно сделать следующие выводы.

1. Образцы материалов – стеклотекстолит АФ10 ВП1Ф 624. 000.- ОТУ 32, клей К-300-61 при испытании длительностью 100 часов дают общую потерю массы более 1 %, летучих конденсированных веществ — не более 0,07 %. Эти материалы не могут быть использованы в составе телескопа космического аппарата (КА), поскольку не соответствуют требованиям ГОСТ Р 50109-92 (ОСТ 92-9566-82). Коэффициент пропускания в диапазоне от 500 нм до 700 нм у конденсированных продуктов материала стеклотекстолита изменяется от 0,827 до 0,974, у клея К-300-61 – от 0,93 до 0,95 соответственно.

2. Для образцов стеклосотовой панели ССП-1Э Т96-19-95-78 при длительности испытаний 100 часов общая потеря массы составляет менее 1 %, однако содержание летучих конденсирующихся веществ в среднем составило 0,13 %, что превышает требования, определённые в ГОСТ Р 50109-92 (ОСТ 92-9566-82). Ко-

эффициент пропускания в диапазоне от 500 нм до 700 нм у конденсированных продуктов материала стеклосотовых панелей стеклотекстолита изменяется от 0,590 до 0,532 соответственно.

3. Конструкционные материалы стеклотекстолит, стеклосотовая панель, соединения клеем К-300-61 могут быть использованы в составе телескопа космического аппарата, если предварительно их выдержать в вакуумной камере при разряжении $1 \cdot 10^{-6}$ Па в течение двух-трёх суток (время, достаточное для уноса с поверхности ЛКВ) при температуре (не приводящей к деструкции материала) порядка 125 °С.

Таким образом, для заключения о возможности использования материалов в составе конструкции телескопа КА необходима комплексная проверка материала на соответствие требованиям ГОСТ Р 50109-92 (ОСТ 92-9566-82) с учётом изменения спектральных характеристик оптических элементов. Измерение динамики конденсированных продуктов (массы осаждения, толщины осаждённой пленки) важно для расчёта справочного параметра показателя поглощения.

Библиографический список

1. ОСТ 92-9566-82. Материалы неметаллические наружных поверхностей изделий. Метод испытания на потерю массы и общее содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии. М.: Стандартинформ, 1982.

2. ГОСТ Р 50109-92. Материалы неметаллические. Метод испытания на потерю массы и содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии. М.: Издательство стандартов, 1992.

3. http://www.aac-research.at/products/products_AAC_SpaceTelescope_Outgassing_en.html.

4. ГОСТ 27124-86. Резонаторы пьезоэлектрические производственно-технического назначения и для бытовой радиоэлектронной аппаратуры. Основные параметры. М., 1986.

5. Акишин А.И., Зазулин В.С. Контроль толщины пленок, получаемых в вакууме, кварцевым резонатором // Приборы и техника эксперимента. 1963. №1. С. 152-154.

6. Scurat V.E., Tansyrev G.D., Beriozkina N.G., Volkov A.V., Jigatch A.N., Leipuksky I.O., Pshenichnikov P.A., Samsonov P.V., Toropov V.P., Demigod S.A., Naumov S.F., Sokolova S.P. Surface Contamination of Some Materials of the Space

Station "MIR" // High Performance Polymers, 2001. V.13, no. 4. P. 337-353.

7. Акишин А.И. Работоспособность космического оборудования при воздействии собственной внешней атмосферы аппарата // Труды VIII Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». М.: НИИЯФ МГУ, 2007. С. 15-19.

8. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.

9. Давыденко С.В., Цаплин С.В. Исследование динамики конденсированных продуктов конструкционных матери-

алов // Сборник трудов XXVIII Российской школы по проблемам науки и технологий. Миасс. С. 71-77.

10. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990. 320 с.

11. Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких плёнок. Справочник Т. 1. М.: Советское радио. 1977. 664 с.

12. Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких плёнок. Справочник Т. 2. М.: Советское радио, 1977. 768 с.

13. ГОСТ 26.003-80. Система интерфейса для измерительных устройств с байт-последовательным, бит-параллельным обменом информацией. Требования к совместимости. М.: Стандартиформ, 1980.

Информация об авторах

Цаплин Сергей Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела и неравновесных систем, Самарский государственный университет. E-mail: tsaplin@samsu.ru. Область научных интересов: теплообмен, космическое машиностроение.

Большев Станислав Александрович, ведущий инженер-программист, Самарский государственный университет. Область научных интересов: теплообмен, математическое моделирование, космическое машиностроение.

RESEARCH OF THE DYNAMICS OF CONDENSED PRODUCT DEPOSITION

© 2014 S.V. Tsaplin, S. A. Bolychev

Samara State University, Samara, Russian Federation

The paper is devoted to the research of structural nonmetallic materials used in the construction of spacecraft for mass loss and gas release in a vacuum-thermal environment, as well as the research of the dynamics of deposition of gas release condensed products on the optical surfaces of optical equipment. A test bench has been developed for carrying out research of the dynamics of deposition of condensed products based on quartz crystal microbalance. In accordance with the State Standards GOST R 50109-92 mass loss and gas release tests of structural non-metallic materials (fiberglass, fiberglass honeycomb panel, polyurethane foam, tapes, textiles, adhesives, etc.) used in spacecraft construction have been carried out. The effect of the deposition of condensed products of gas release from these materials on the transmission coefficient of the optical element is determined. A conclusion about the possibility of using these materials in constructing spacecraft is made.

Quartz sensor, microbalance, gas release, deposition, volatile condensed substances.

References

1. OST 92-9566-82. Nonmetallic materials of outer surfaces. Method of testing mass loss and content of volatile condensable materials in a vacuum-thermal environment. Moscow: Standartinform Publ., 1982. (In Russ.)

2. GOST R 50109-92. Nonmetallic materials. Test method for mass loss and content of volatile condensable materials in a vacuum-thermal environment. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1992. (in Russ.)
3. http://www.aacesearch.at/product/s/products_AAC_SpaceTesthouse_Outgassing_en.html.
4. GOST 27124-86. Piezoelectric resonators for industrial and domestic radioelectronic equipment. Basic parameters. Moscow: 1986. (In Russ.)
5. Akishin A.I., Zazulin V.S. Thickness control of films produced in vacuum by a quartz crystal resonator // Pribory i tehnika eksperimenta. 1963. No. 1. P. 152-154. (In Russ.)
6. Scurat V.E., Tansyrev G.D., Beriozkina N.G., Volkov A.V., Jigatch A.N., Leipuksky I.O., Pshenichnikov P.A., Samsonov P.V., Toropov V.P., Demigod S.A., Naumov S.F., Sokolova S.P. Surface Contamination of Some Materials of the Space Station "MIR" // High Performance Polymers. 2001. V.13, no. 4. P. 337-353.
7. Akishin A.I. Space equipment operability under the influence of own atmosphere of spacecraft // Trudy VIII Mezhvuzovskoy nauchnoy shkoly molodykh spetsialistov "Kontsentrirovannyye potoki energii v kosmicheskoy tekhnike, elektronike, ekologii i meditsine" Moscow: NIIYAF MGU Publ., 2007. P. 15-19. (In Russ.)
8. Malov V.V. P'ezorezonansnyye datchiki [Piezoresonance sensors]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 272 p. (In Russ.)
9. Davydenko S.V., Tsaplin S.V. Deposition dynamics research of condensed products of structural materials // Sbornik trudov XXVIII Rossiyskoy shkoly po problemam nauki i tehnology. Miass, 2008. P. 71-77. (In Russ.)
10. Rosanov L.N. Vakuumnaya tekhnika [Vacuum engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1990. 320 p.
11. Maisell L.I., Glang R. Tekhnologiya tonkikh plenok [Handbook of thin film technology]. V. 1. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1977. 664 p.
12. Maisell L.I., Glang R. Tekhnologiya tonkikh plenok [Handbook of thin film technology]. V. 2. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1977. 768 p.
13. GOST 26.003-80. Interface system for measuring devices with byte-serial, bit-parallel exchange of information. Moscow: Standartinform Publ., 1980. (In Russ.)

About the authors

Tsaplin Sergey Vasilevich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Solid State Physics and Non-Equilibrium Systems, Samara State University. E-mail: tsaplin@samsu.ru. Area of Research: heat and mass transfer, space engineering.

Bolychev Stanislav Alexandrovich, Principal Software Engineer, Samara State University. Area of Research: heat and mass transfer, mathematical modeling, space engineering.