

В. Н. Елисеев, В. А. Товстоног

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Рассмотрены возможности применения газоразрядных трубчатых водоохлаждаемых источников излучения для моделирования тепловых режимов космических конструкций. В целях наиболее полного воспроизведения спектра излучения Солнца предложено использование водоохлаждаемой кварцевой оболочки излучателя как фильтра излучения. Показано, что возникающие при этом изменения в коэффициенте поглощения не приводят к критическим изменениям в температурном состоянии оболочки-фильтра.

E-mail: v.n.eliseev@gmail.com; tovstonv@mail.ru

Ключевые слова: космические аппараты, тепловой режим, моделирование, излучение.

Создание космических аппаратов (КА) и конструкций с длительным сроком функционирования предопределяет важность проблемы оценки изменения физических свойств материалов под действием факторов космического пространства. Эта проблема особенно актуальна при создании перспективных крупногабаритных КА, содержащих большое число конструктивных элементов из неметаллических, в том числе полимерных, материалов, свойства которых существенно изменяются под воздействием факторов космической среды. Одним из наиболее значимых является ультрафиолетовое излучение Солнца, вызывающее деградацию свойств, а значит, и изменение всех физико-механических характеристик материалов. Для крупногабаритных космических конструкций с характерными размерами в десятки метров (антенн, панелей систем энергообеспечения и терморегулирования) это может привести к изменению характеристик жесткости конструктивных элементов, их динамических характеристик и формы.

Наиболее объективными для оценки являются прямые экспериментальные исследования при длительном экспонировании образцов материалов на борту КА в условиях космического пространства [1]. Однако сложности, связанные с проведением таких исследований, не являются главным ограничением. Важно то, что они не позволяют получать оперативные данные применительно к вновь создаваемым или предполагаемым к использованию в разрабатываемых космических конструкциях материалам. Другими словами, время разработки нового материала (равно как и некоторых технических решений, требующих экспериментальной проверки) может быть существенно меньше времени, требуемого для исследований изменения свойств материала под действием факторов окружающей среды — старения (которое не

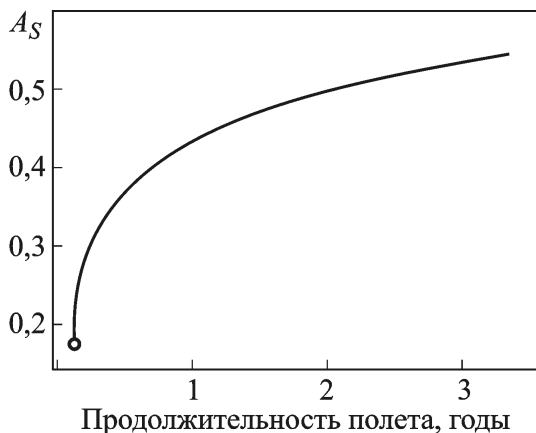


Рис. 1. Изменение коэффициента поглощения покрытия на геостационарном спутнике связи

обязательно проявляется как ухудшение свойств). В связи с этим актуальны методы ускоренных наземных испытаний, один из возможных подходов рассмотрен в работе [2].

В настоящее время наиболее изучено влияние УФ излучения Солнца на оптические свойства терморегулирующих покрытий, показывающее определяющее значение этого фактора космического пространства (рис. 1) [3]. Однако, если подобные исследования могут проводиться на образцах материалов с использованием лабораторных установок, имитирующих излучение Солнца, то для проведения исследований, связанных с оценкой влияния УФ излучения Солнца на температурный режим конструкции и динамические характеристики ее крупногабаритных элементов, для которых этот фактор является определяющим, необходимо располагать соответствующей стендовой базой, обеспечивающей воздействие излучения с параметрами, аналогичными излучению Солнца.

Вообще говоря, ряд специалистов считает, что имитация истинных условий космоса, возможно, никогда не будет достигнута, но любая степень приближения к ним стоит затраченных усилий. Однако на практике всегда ограничиваются разумной степенью приближения, определяемой некоторым пересечением технической осуществимости и экономической целесообразности создания наземных экспериментальных установок.

В странах с развитой аэрокосмической промышленностью создан ряд установок с рабочим объемом от сотен до нескольких тысяч кубических метров [4–7], имеющих сложную систему имитации солнечного излучения, включающую в себя десятки и сотни единичных источников излучения. Следует отметить, что в настоящее время промышленностью серийно выпускаются высоковакуумные установки объемом до 5000 м^3 , содержащие имитаторы излучения Солнца [8],

поэтому проблема лабораторного моделирования воздействия одного из основных факторов космического пространства в определенной степени может считаться решенной. Однако в этих установках используются блоки излучателей, содержащие сотни единичных источников излучения мощностью 2...10 кВт, что создает определенные трудности при эксплуатации.

Первоначально в качестве источников излучения применяли угольно-дуговые лампы, достаточно хорошо имитировавшие спектральное распределение энергии Солнца во всем диапазоне длин волн, кроме ультрафиолетовой области (0,2...0,4 мкм), где недостаток мощности можно было компенсировать с помощью дополнительных источников. Однако этот вид ламп имел ряд существенных недостатков: в частности, из-за быстрого сгорания положительного электрода (для дуги мощностью 10 кВт скорость сгорания составляла 0,5 м/ч) его постоянно приходилось заменять новым, кроме того, механизм подачи электродов достаточно сложен, нужно было защищать элементы оптической системы (зеркала, отражающие и преломляющие свет, линзы и пр.) от загрязнения продуктами сгорания.

Поэтому начали применять лампы с газовым наполнением (ксеноновые, ртутно-ксеноновые), сочетающие в себе яркость угольной дуги с удобством эксплуатации. Вместе с тем и эти лампы имели недостатки. Так, в видимой и ИК областях спектра они имитировали солнечное излучение хуже, чем угольно-дуговые лампы. В процессе развития оба типа ламп совершенствовались — разрабатывался нерасходуемый отрицательный электрод в угольно-дуговой лампе, улучшалась имитация солнечного спектра за счет введения дополнительных газов в ксеноновые и ртутно-ксеноновые лампы и т.д. Иногда исследователи идут по пути совмещения работы нескольких (обычно двух) типов источников излучения, один из которых обеспечивает воздействие УФ области спектра (как правило, это ртутные газоразрядные лампы), в то время как другой тип источников излучения (кварцевые вольфрам-галогенные лампы) моделирует излучение Солнца в видимой и ИК областях спектра, что позволяет добиться лучшего согласования с условиями реального воздействия излучения.

Механизм воздействия разных участков спектра излучения на материальную среду совершенно различен, что определяется атомно-молекулярной структурой вещества. Так, под действием коротковолнового видимого, а особенно УФ излучения в полимерных материалах развиваются реакции деструкции и структурирования (сшивки) макромолекул [9]. Фотохимические изменения в веществе вызывает только та часть падающего потока излучения, которая поглощается веществом, т.е. для протекания реакции необходимо, чтобы молекула поглотила квант света достаточной энергии, определяемый законом Планка:

$\varepsilon = h\nu$, где h — постоянная Планка, ν — частота излучения. Причем каждый поглощенный фотон активирует только одну молекулу, переводя ее в электронно-возбужденное состояние, которое характеризуется определенной энергией, структурой и временем жизни. Молекула в электронно-возбужденном состоянии может находиться в течение некоторого времени (времени жизни), после чего происходит переход в другое состояние с рассеянием энергии в различного рода излучательных и безызлучательных процессах. Изменение молекулярной структуры полимера, обуславливающее его старение, происходит при диссоциации связей атомов, каждая из которых характеризуется энергией разрыва. Таким образом, процессы деструкции протекают только под действием излучения с соответствующей энергией кванта $E = 1,197 \cdot 10^8 / \lambda$ Дж/моль (где $\lambda = c_0/\nu$ — длина волны излучения в нм, c_0 — скорость света), равной энергии разрыва связи. На рис. 2 приведена зависимость энергии излучения кванта от длины волны и показаны энергии разрыва некоторых характерных связей. Как видно, фотоактивная часть излучения расположена в УФ-диапазоне спектра при $\lambda < 400$ мкм. Частицы, образовавшиеся в результате деструкции макромолекул, могут уходить из системы или вступать во вторичные реакции. Таким образом, фотохимические реакции при воздействии УФ-излучения имеют две стадии: первичную, которая происходит в электронно-возбужденном состоянии, реализующемся вследствие поглощения излучения, и вторичную, составляющую совокупность реакций частиц, образующихся в результате первичной стадии.

При воздействии излучения видимой и ИК областей спектра возбуждаются только колебательные и вращательные степени свободы молекул, что проявляется как тепловое воздействие излучения с возможным изменением физических свойств вещества, обусловленным изменением температуры. Это, в свою очередь, обуславливает определенную взаимосвязь между фотохимическим и тепловым действием излучения. Так, известно, что реакции активных частиц (радикалов) в полимерных материалах зависят от характеристик диффузии радикалов [10], т.е. от физических свойств среды.

Поскольку невозможно (кроме как в натуральных условиях космического пространства) обеспечить полное соответствие спектра воздействующего излучения солнечному, проблема стендового моделиро-

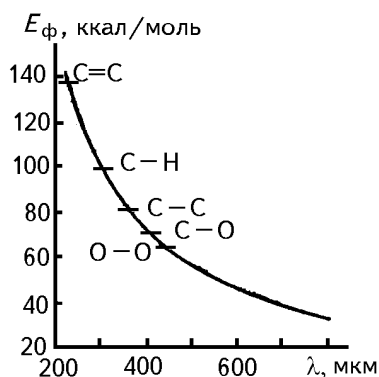


Рис. 2. Зависимость энергии излучения кванта от длины волны излучения и энергии разрыва характерных связей [9]

вания воздействия солнечного излучения может быть сформулирована следующим образом: во-первых, необходимо обеспечить заданную плотность потока излучения на поверхности испытуемого объекта, и, во-вторых, соотношение плотности потока излучения в фотоактивной (ультрафиолетовой) и тепловой областях спектра должно соответствовать натурным условиям.

Наиболее интенсивными источниками УФ излучения являются ртутные лампы среднего и высокого давления. При этом относительное распределение энергии в спектре излучения характеризуется величинами, приведенными в таблице.

Относительное распределение энергии в спектре газоразрядных ртутных источников излучения

Диапазон спектра, мкм	Доля полной энергии излучения, %	
	Лампы среднего давления	Лампы высокого давления
0,23–0,28	16,4	4,35
0,28–0,32	21,5	26,67
0,32–0,40	19,4	21,2
0,40–0,60	42,7	47,8

Следует отметить существенно линейчатую структуру спектра излучения ртутных ламп. В целях корректировки спектра излучения в состав рабочего тела вводят добавки — йодиды (галоиды) металлов (металлогалогенные лампы), однако это приводит к нестабильности дугового разряда и снижению срока службы. Кроме того, лампы этого типа весьма чувствительны к температурному режиму¹, а перегрев, так же как и переохлаждение, существенно влияет на их работоспособность.

Как следует из таблицы, на долю фотоактивного диапазона спектра ртутных ламп приходится более половины всего излучения, в то время как в солнечном спектре эта доля составляет около 9%. В связи с этим при использовании ртутных источников излучения необходимо применять коррекцию спектра с использованием фильтров излучения или селективно отражающих покрытий в системе фокусировки излучения.

Альтернативным источником излучения, лишенным указанного недостатка, являются газоразрядные лампы с ксеноновым наполнением, которые чаще всего используются в современных испытательных установках, моделирующих излучение Солнца. Однако доля излучения таких источников в коротковолновой ($\lambda < 0,4$ мкм) области спектра составляет $\sim 3,5 \dots 4\%$. Поэтому для обеспечения необходимого

¹Температура колбы ламп среднего давления достигает 500 °С, а ламп высокого давления — 900 °С.

соотношения плотности потока излучения в коротковолновой области спектра $\sim 9\%$ относительно полного потока и его абсолютного значения, соответствующего внеатмосферному участку полета, $\sim 1400 \text{ Вт/м}^2$ необходимо соответствующим образом увеличивать плотность потока излучения источника, ослабляя его в видимой и ИК областях спектра.

Для моделирования тепловых режимов крупногабаритных конструкций потребная мощность излучения может достигать сотен киловатт. Газоразрядные источники излучения (ГИИ), охлаждаемые только за счет естественной конвекции и собственного излучения оболочки, имеют сравнительно малую мощность, обусловленную допустимой температурой оболочки, что при потребных мощностях вызывает необходимость использования большого числа единичных источников. Применение для этой цели водоохлаждаемых трубчатых ГИИ с двумя коаксиально расположенными кварцевыми оболочками долгое время считалось проблематичным из-за возможности разгерметизации охлаждающего тракта в узлах подвода охлаждающей жидкости, при этом одновременно выполняющих и функции сильноточных токоподводов, и относительно небольшого ресурса работы ГИИ при повышенных мощностях. Опыт работы с такими источниками на кафедре “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана позволил разработать усовершенствованные компактные узлы подвода охладителя и электропитания, существенно повысившие надежность и ресурс работы.

Разработанная конструкция ГИИ содержит две цилиндрические кварцевые оболочки, формирующие тракт охлаждения, через который при давлении ~ 5 атм прокачивается охладитель — дистиллированная вода. При необходимости внешняя оболочка ГИИ может выполнять роль фильтра в требуемых диапазонах длин волн, для чего в состав кварцевого стекла при варке следует ввести соответствующие добавки. Эта концепция была реализована при отработке метода бесконтактного измерения температуры объекта, нагреваемого излучением многоламповой установки, — в состав стекла была введена добавка, выделяющая узкую полосу поглощения в спектре излучения на рабочей длине волны пирометра.

Внутренняя оболочка с впаянными в нее сильноточными электродами и ксеноновым наполнением представляет собой разрядную трубку — горелку (большая номенклатура которых серийно выпускается промышленностью). Некоторые типы горелок имеют достаточно большой ресурс работы не только в номинальном режиме, но допускают также многократное форсирование и регулирование мощности излучения. Наиболее совершенным и отработанным для эксплуатации в непрерывном режиме является трубчатый газоразрядный источник излучения ДТП-10/200 с номинальной мощностью 15 кВт, на основе

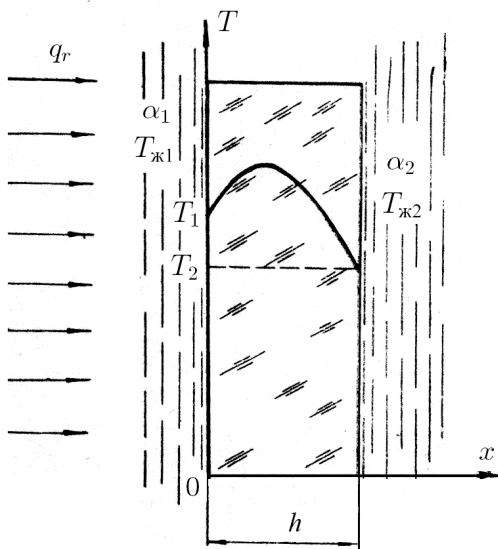


Рис. 3. К определению температурного поля оболочки-фильтра

ния на оболочку-фильтр, условия ее теплообмена с окружающей средой и характер изменения температурного поля показаны на рис. 3. Видно, что проходящий через слой охлаждающей жидкости поток излучения ГИИ, частично поглощаясь в оболочке, формирует в ней неравномерное температурное поле, имеющее максимум на некоторой глубине.

С возрастом поглощательной способности оболочки-фильтра увеличивается доля поглощаемой ею энергии излучения, что может вызвать ее перегрев и разрушение. Ответ на вопрос о реальности такого случая можно получить из решения приведенной далее краевой задачи, принимая при этом допущение о возможности представления задачи в одномерной постановке для процесса теплообмена в плоском слое [13].

Распределение температуры в фильтре в установившемся режиме работы находится из решения дифференциального уравнения

$$\Lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + \bar{k} q_r e^{-\bar{k}x} = 0, \quad (1)$$

где Λ — коэффициент теплопроводности; \bar{k} — интегральный коэффициент поглощения; q_r — плотность потока излучения, прошедшего через поверхность фильтра при $x = 0$.

Граничные условия учитывают теплообмен на граничных поверхностях и задаются в виде

$$\Lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = \alpha_1 (T_1 - T_{ж1}); \quad (2)$$

которого был создан целый ряд моделирующих установок высокоинтенсивного излучения [11, 12].

Ключевая проблема создания модуля-излучателя на основе трубчатых водоохлаждаемых ГИИ, который может быть положен в основу многомодульной установки для испытаний крупногабаритных космических конструкций, состоит в обеспечении допустимого температурного состояния наружной оболочки, выполняющей роль фильтра излучения. Схема теплового воздействия излучения

$$-\Lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=h} = \alpha_2 (T_2 - T_{ж2}), \quad (3)$$

где T_1, T_2 – температуры внутренней и наружной поверхностей фильтра; h – толщина.

Решение краевой задачи (1)–(3) имеет вид

$$T_1 = \frac{T_{ж2} + T_{ж1} \left(\text{Bi}_1 + \frac{\text{Bi}_1}{\text{Bi}_2} \right) + \frac{q_r h}{\Lambda} \left[1 - \left(\frac{1}{\text{Bu}} - \frac{1}{\text{Bi}_1} \right) (1 - e^{-\text{Bu}}) \right]}{1 + \text{Bi}_1 + \text{Bi}_1 / \text{Bi}_2};$$

$$T_2 = \frac{T_{ж2}(1 + \text{Bi}_1) + T_{ж1} \frac{\text{Bi}_1}{\text{Bi}_2} + \frac{q_r h}{\Lambda} \left[\frac{1}{\text{Bi}_2} (1 - e^{-\text{Bu}} + \text{Bi}_1 \frac{1 - e^{-\text{Bu}}}{\text{Bu}}) - \frac{\text{Bi}_1}{\text{Bi}_2} e^{-\text{Bu}} \right]}{1 + \text{Bi}_1 + \text{Bi}_1 / \text{Bi}_2}, \quad (4)$$

где $\text{Bi}_1 = \alpha_1 h / \Lambda$, $\text{Bi}_2 = \alpha_2 h / \Lambda$ – критерии Био; $\text{Bu} = \bar{k} h$ – критерий Бугера.

Температура фильтра в произвольной точке на расстоянии x от начала координат имеет вид

$$T(x) = T_1 + \frac{q_r h}{\Lambda} \frac{1}{\text{Bu}} \left(1 - e^{-\text{Bu} \frac{x}{h}} \right) - \left(\frac{q_r h}{\Lambda} - T_1 \text{Bi}_1 + T_{ж1} \text{Bi}_1 \right) \frac{x}{h}. \quad (5)$$

Функция $T(x)$ имеет максимум при

$$\left(\frac{x}{h} \right)_{\max} = \frac{1}{\text{Bu}} \ln \frac{1}{1 - \frac{\alpha_1}{q_r} (T_1 - T_{ж1})} \quad (6)$$

и определяется соотношением

$$T_{\max} = T_1 + \frac{\text{Bi}_1}{\text{Bu}} (T_1 - T_{ж1}) - \left(\frac{q_r h}{\Lambda} - T_1 \text{Bi}_1 + T_{ж1} \text{Bi}_1 \right) \frac{1}{\text{Bu}} \ln \frac{1}{1 - \frac{\alpha_1}{q_r} (T_1 - T_{ж1})}. \quad (7)$$

Оценка влияния поглощательной способности оболочки-фильтра на температурное состояние получена при следующих исходных данных: мощность ГИИ $P = 15$ кВт; коэффициент полезного действия ГИИ, характеризующий отношение выходящего потока излучения к электрической мощности, $\eta = 0,62$; толщина фильтра $h = 1,5$ мм; внутренний диаметр оболочки-фильтра $d_3 = 15$ мм; расстояние между электродами ГИИ $l = 0,2$ м; температура воды в охлаждающем тракте $T_{ж1} = 35$ °С; расход воды $0,5$ кг/с; температура воздуха с внешней стороны фильтра $T_{ж2} = 25$ °С; коэффициент теплоотдачи $\alpha_2 = 30$ Вт/(м²·К); коэффициент теплопроводности материала фильтра $\Lambda = 1,64$ Вт/(м·К).

Коэффициент теплоотдачи в охлаждающем тракте вычисляется по формуле

$$\alpha_{ж1} = 0,023 \text{ Re}^{0,8} \text{ Pr}^{0,4} \frac{\Lambda_{ж}}{d_{\text{ЭКВ}}},$$

где $d_{\text{ЭКВ}} = 4F/\Pi_{\text{см}}$, F — площадь поперечного сечения охлаждающего тракта; $\Pi_{\text{см}}$ — смоченный периметр.

Интегральный коэффициент поглощения фильтра варьировали от $\bar{k} = 0,0035 \text{ мм}^{-1}$ (для чистого кварцевого стекла) до $2,1 \text{ мм}^{-1}$, т.е. изменяли в 600 раз.

Суммарная плотность потока излучения, поглощаемого фильтром, определяется в соответствии с законом Бугера как

$$q_{a,\Sigma} = q_r(1 - e^{-\text{Bu}}),$$

где для заданного уровня мощности ГИИ $q_r = \frac{P\eta}{F_{\text{вн}}} = 0,99 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Большая часть поглощенного фильтром излучения передается охлаждающей жидкости и определяется соотношением

$$q_1 = \Lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0},$$

а из формулы (5) имеем

$$\frac{dT}{dx} = \frac{q_r}{\Lambda} e^{-\text{Bu} \frac{x}{h}} - \left(\frac{q_r h}{\Lambda} - T_1 \text{Bi}_1 + T_{ж1} \text{Bi}_1 \right) \frac{1}{h}.$$

При $x = 0$

$$q_1 = \frac{\Lambda}{h} \text{Bi}_1 (T_1 - T_{ж1}).$$

Тепловой поток, отводимый от внешней поверхности фильтра ($x = h$) путем свободной конвекции,

$$q_2 = q_r(1 - e^{-\text{Bu}}) - \frac{\Lambda}{h} \text{Bi}_1 (T_1 - T_{ж1}).$$

Результаты расчетов приведены на рис. 4 и 5. На рис. 4 видно, что температура на внутренней поверхности фильтра возрастает с увеличением поглощательной способности и, как это следует из формулы (4), при $\text{Bu} \rightarrow \infty$ соответствует температуре непрозрачной стенки

$$T_1 = \frac{T_{ж2} + T_{ж1} \left(\text{Bi}_1 + \frac{\text{Bi}_1}{\text{Bi}_2} \right) + \frac{q_r h}{\Lambda} \left(1 + \frac{1}{\text{Bi}_2} \right)}{1 + \text{Bi}_1 + \frac{\text{Bi}_1}{\text{Bi}_2}},$$

что при заданных условиях дает $T_1 = 74,3^\circ\text{C}$.

Наибольший практический интерес представляет значение максимальной температуры в оболочке-фильтре. С уменьшением

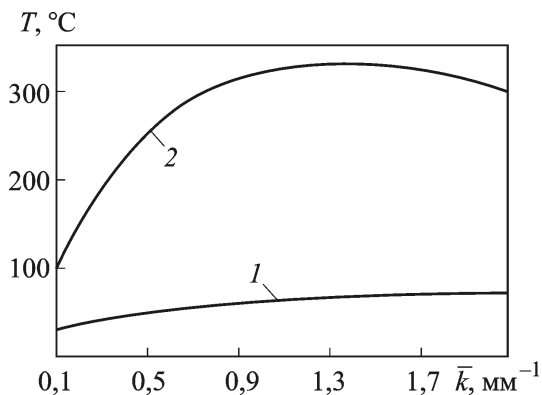


Рис. 4. Зависимости температур T_1 (1) и T_{\max} (2) от интегрального коэффициента поглощения материала оболочки-фильтра

прозрачности имеет место ее рост до значения $T_{\max} = 329^\circ\text{C}$ при $\bar{k} \approx 1, \text{ мм}^{-1}$. Это сравнительно небольшая температура по сравнению с допустимым значением $T_{\text{доп}} \approx 1200^\circ\text{C}$ для кварцевого стекла. При дальнейшем увеличении коэффициента поглощения \bar{k} происходит снижение T_{\max} и при $\bar{k} \rightarrow \infty$ $T_{\max} \rightarrow T_1 = 74,3^\circ\text{C}$. Такой характер изменения температуры T_{\max} при монотонно возрастающем количестве поглощенной энергии излучения (рис. 5) обусловлен тем, что при увеличении коэффициента поглощения происходит смещение координаты максимума температуры к внутренней интенсивно охлаждаемой поверхности фильтра (формула (6)) и при $\bar{k} \rightarrow \infty$ максимальная температура достигается на поверхности $x = 0$, чему способствует уменьшение термического сопротивления участка стенки между $x = 0$ и $x_{\max}(T_{\max})$.

С увеличением коэффициента поглощения энергия излучения, поглощаемая на этом участке (q_1 , см. рис. 5) стремится к значению энергии, поглощаемой непрозрачной стенкой, и лишь малая ее доля q_2 отводится от внешней поверхности в окружающую среду путем конвекции.

Проведенный анализ теплового режима оболочки водоохлаждаемого ГИИ, выполняющей и роль фильтра излучения, показывает, что ее температурное состояние не является ограничением для коррекции спектра излучения в целях наилучшего соответствия спектру излучения Солнца.

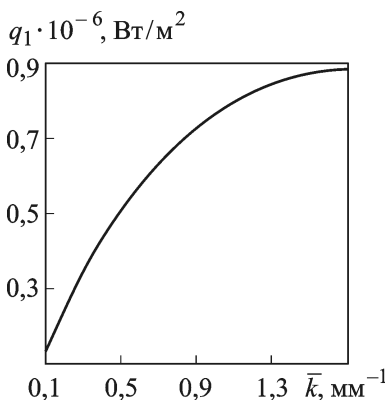


Рис. 5. Зависимость плотности потока излучения, поглощенного фильтром на участке $0 < x \leq x_{\max}$, от интегрального коэффициента поглощения

Опыт разработки и эксплуатации моделирующих установок с использованием трубчатых водоохлаждаемых ГИИ показывает, что оптимальной является конструкция, построенная на базе трехламповых модулей. Такой модуль с оболочками-фильтрами, снабженный фокусирующей системой, может быть использован для моделирования воздействия солнечного излучения при тепловых испытаниях крупнобаритных космических конструкций. Так, трехламповый модуль с суммарной мощностью $P = 45 \dots 90$ кВт с учетом КПД источников излучения и отражателя обеспечивает заданную плотность потока излучения ~ 1400 Вт/м² на поверхности $\sim 18 \dots 36$ м², и даже при 5-кратном уменьшении потока излучения за счет поглощения в оболочке-фильтре и потерь в фокусирующей системе значение облучаемой поверхности может составить от 3,5 до 7 м².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старцев О. В., Никишин Е. Ф. Старение полимерных композитных материалов в условиях открытого космоса // Механика композитных материалов. – 1993. – № 4. – С. 457–467.
2. Товстоног В. А. Комплексное моделирование характеристик старения полимерных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2007. – № 3. – С. 3–22.
3. Акишин А. И., Новиков Л. С. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. – М.: Знание, 1983. – 64 с.
4. Имитация космического полета [Электронный ресурс]. URL: http://astronaut.ru/bookcase/books/sharp01/text/26.html?reload_coolmenu
5. Космос начинается на Земле [Электронный ресурс]. URL: <http://vbega.ru/book/e2e28ed.html>
6. Комплекс стендов и оборудования ЦСКБ “Прогресс” для исследования и испытания КА и их систем [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sumspace.ru>
7. ОАО “НПО “Молния”. Лабораторная и стендовая база [Электронный ресурс]. URL: tehotdel@promolnija.ru; molnija@promolnija.ru
8. Имитаторы космического пространства “ООО “БЛИМ Синержи” [Электронный ресурс]. URL: www.sales@blms.ru
9. Рэнби Б., Рабек Я. Фотодеструкция, фотоокисление, фотостабилизация полимеров. – М.: Мир, 1978. – 675 с.
10. Эмануэль Н. М. Бучаченко А. Л. Химическая физика старения и стабилизации полимеров. – М.: Наука, 1982. – 360 с.
11. Установка лучистого нагрева широкого применения / В.Н.Елисеев, В.А.Товстоног, К.В.Чирин и др. // Вести АН БССР. Сер. физико-энергетических наук. – 1990. – № 2. – С. 93–97.
12. Товстоног В. А., Томак В. И., Цветков С. В., Чирин К. В. Экспериментальный комплекс для теплопрочностных испытаний материалов и элементов конструкций при высокоинтенсивном нагреве // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 1. – С. 67–76.
13. Елисеев В. Н. К расчету температуры цилиндрической колбы охлаждаемой газоразрядной лампы // Светотехника. – 1969. – № 3. – С. 6.

Статья поступила в редакцию 3.04.2012