

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ОТ НАГРЕТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ

### SIMULATION OF THE HEAT FLUX DUE TO HEATED BODIES IN THE THERMAL VACUUM TEST

*A.A.Филатов*<sup>1</sup> / *filatov@geliosfera.com*, *A.A. Кушалов*<sup>1</sup>, *И.А. Марченко*<sup>2</sup>, *А.А.Моисеев*<sup>1</sup>, *О.В.Пастушенко*<sup>2</sup>, *П.Г.Смирнов*<sup>1</sup>, *А.К.Шаров*<sup>2</sup>, *А.А.Шевчук*<sup>2</sup>

**A.A.Filatov, A.A Kishalov, I.A.Marchenko, A.A.Moiseev, O.V. Pastushenko, P.G.Smirnov, A.K.Sharov, A.A.Shevchuk**

<sup>1</sup>ООО «НПО Гелиосфера», г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>АО «ИСС», г. Железногорск, Красноярский край

*Рассмотрено моделирование дополнительных тепловых потоков от нагретых тел в вакуумной камере при проведении термовакuumных испытаний и сравнение их с экспериментом. Предложена методика измерения дополнительных потоков с использованием модели адиабатической стенки.*

*Ключевые слова: термовакuumные испытания, имитатор тепловых потоков, радиационный теплообмен, трассировка лучей*

*We consider the simulation of the additional heat flows produced by the heated bodies in the vacuum chamber while thermal vacuum testing alongside with the matching to the experimental data. Adiabatic wall heat flux sensor is proposed as a key element for the additional heat flow measurement method.*

*Key words: thermal vacuum test, heat flux simulator, radiative heat transfer, ray tracing*

При проведении термовакuumных испытаний (ТВИ) с использованием имитатора солнечного излучения (ИСИ) формирование светового пятна на объекте испытаний осуществляется с помощью системы зеркал, расположенных в вакуумной камере. При этом зеркала поглощают часть падающего на них светового излучения. При поглощении излучения зеркала разогреваются и становятся источником инфракрасного (ИК) излучения. Это приводит к тому, что на объект испытаний падает дополнительный тепловой поток, который необходимо учитывать при проведении ТВИ.

Несмотря на распространенность ИСИ с одним коллимирующим зеркалом, более общим случаем является двухзеркальная компоновка, в которой коллимирующее (главное) зеркало дополняется еще одним (вторичным) зеркалом, служащим для оптимальной совместной компоновки ИСИ с вакуумной камерой.

При проведении ИСИ весьма важен учет так называемого дополнительного теплового потока от разогретых частей ИСИ. Однако этот параметр часто остается за рамками процесса проектирования.

Целью данной работы является разработка методики численного моделирования дополнительного теплового потока и сравнение с экспериментальными данными.

Рассмотрим соотношение тепловых потоков на зеркалах термовакuumной установки. Будем считать зеркало плоской стенкой, имеющей постоянную температуру по поверхности и по толщине. Каждая поверхность такой стенки имеет разную степень черноты  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , площадь поверхности стенки  $S_w$ . Стенка находится в замкнутом объеме

(криоэкраны вакуумной камеры) с температурой  $T_\infty$  и площадью поверхности  $S_\infty$ , причем выполняется условие:

$$S_\infty \gg S_w \quad (1)$$

Тепловой поток для такой системы тел «зеркало-криоэкраны» с учетом условия (1) можно записать как [1]:

$$Q \sim \frac{\sigma S_w (T_w^4 - T_\infty^4)}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{S_w}{S_\infty} \left( \frac{1}{\varepsilon_\infty} - 1 \right)} \sim \sigma S_w \varepsilon_w (T_w^4 - T_\infty^4) \quad (2)$$

где  $\varepsilon_w$  некая приведенная степень черноты поверхности зеркала. Схема баланса тепловых потоков на зеркале приведена на рис. 1.

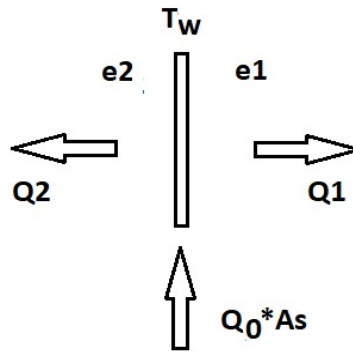


Рис. 1. Схема тепловых потоков на зеркале.

На поверхность зеркала с поглощательной способностью  $A_s$  падает тепловой поток  $Q_0$ , тогда поглощенный поток будет равен:

$$Q_{\text{abs}} = Q_0 A_s \quad (3)$$

При этом зеркало разогревается, и каждая сторона начинает излучать в инфракрасном диапазоне. Тепловые потоки с поверхности определяются как

$$\begin{aligned} Q_1 &= \varepsilon_1 S_w (T_w^4 - T_\infty^4) \\ Q_2 &= \varepsilon_2 S_w (T_w^4 - T_\infty^4) \end{aligned} \quad (4)$$

Суммарный тепловой поток с поверхности стенки:

$$Q_\Sigma = Q_1 + Q_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) S_w (T_w^4 - T_\infty^4) = Q_0 A_s \quad (5)$$

Найдем отношение теплового потока с одной стороны стенки к суммарному тепловому потоку:

$$\frac{Q_1}{Q_\Sigma} = \frac{\varepsilon_1 S_w (T_w^4 - T_\infty^4)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) S_w (T_w^4 - T_\infty^4)} = \frac{\varepsilon_1}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} = \frac{1}{(1 + \varepsilon_2/\varepsilon_1)} \quad (6)$$

Аналогично для теплового потока с другой стороны:

$$\frac{Q_2}{Q_\Sigma} = \frac{\varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} = \frac{1}{(1 + \varepsilon_1/\varepsilon_2)} \quad (7)$$

Таким образом, зная падающий тепловой поток на зеркало, можно определить излученные тепловые потоки:

$$Q_1 = \frac{\varepsilon_1}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} Q_0 A_s \quad (8)$$

и

$$Q_2 = \frac{\varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} Q_0 A_s \quad (9)$$

Для набора типовых зеркал, применяемых в модельной вакуумной установке (МВУ), производились измерения степени черноты и поглощающей способности поверхности. Среднее значение поглощающей способности передней поверхности 0,132, степень черноты передней поверхности зеркала 0,126, степень черноты задней поверхности 0,88.

Зеркала в составе МВУ состоят из массива шестиугольных сегментов, для закрепления которых на общей раме используется монтажный подвес на задней стороне сегмента (рис. 2). Наличие монтажного подвеса с задней стороны приводит к частичному экранированию излучающей поверхности сегмента и снижению эффективной степени черноты.

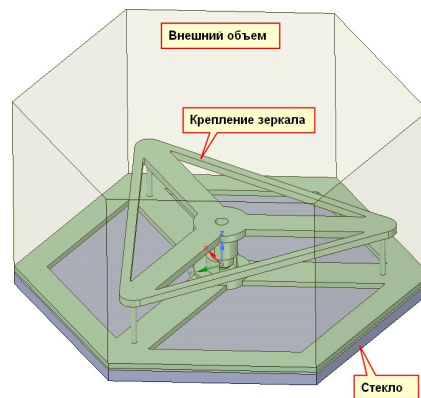


Рис. 2. Сегмент зеркала.

Введем понятие эффективной степени черноты поверхности. Тепловой поток с элементарной площадки задней поверхности зеркала:

$$dq = \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_\infty^4) dS \quad (10)$$

где  $dS$  – элемент поверхности зеркала,  $\varepsilon$  – степень черноты обратной стороны сегмента,  $T_w$  температура задней стороны зеркала,  $T_\infty$  температура криоэкранов.  
Суммарный тепловой поток с поверхности зеркала:

$$Q = \sigma \varepsilon \int_S (T_w^4 - T_\infty^4) dS \quad (11)$$

С другой стороны тепловой поток с поверхности зеркала:

$$Q = \sigma \bar{\varepsilon} (\bar{T}_w^4 - T_\infty^4) S_w \quad (12)$$

где  $\bar{\varepsilon}$  – эффективная степень черноты обратной стороны сегмента,  $\bar{T}_w^4$  – среднее значение четвертой степени температуры задней стороны зеркала.  
Эффективная степень черноты задней поверхности:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sigma \varepsilon \int_F (T_w^4 - T_\infty^4) dF}{\sigma (\bar{T}_w^4 - T_\infty^4) F} = \frac{Q_0}{\sigma (\bar{T}_w^4 - T_\infty^4) S_w} \quad (13)$$

где  $Q_0$  – тепловой поток, поглощенный зеркалом.

Произведем численный расчет сегмента зеркала, которое охлаждается только с задней поверхности, для двух значений поглощенного теплового потока для главного и вторичного зеркал, и определим эффективную степень черноты по (13). Расчет излучения производился с использованием метода дискретных ординат (DO, [2]). Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты численного расчета сегмента зеркала

Зеркало	$q_0, \text{Вт/м}^2$	$Q_0, \text{Вт}$	$T^4, \text{К}^4$	$T, \text{К}$	$T, \text{°C}$	$\varepsilon_{ps}$
Главное	330	41,50	$9,80^{+9}$	314,6	41,6	0,599
Вторичное	3300	414,97	$1,02^{+11}$	564,6	291,6	0,573

Среднее значение степени черноты получается равным  $\sim 0,59$ .

Таким образом, отношение потока с передней поверхности зеркала к падающему потоку составит 0,176, а отношение потока с задней поверхности зеркала (с учетом эффективной степени черноты) к падающему потоку составит 0,824.

Измерение дополнительного теплового потока от объектов в камере МВУ производится датчиком, представляющим собой пластину, у которой с одной стороны степень черноты близка к 1 и эта поверхность является рабочей, а с другой стороны поверхность покрыта слоем экранно-вакуумной теплоизоляции. Таким образом, датчик можно рассматривать как адиабатическую стенку.

Тепловой поток, поглощенный адиабатической стенкой, состоит из двух компонент – световой поток от ИСИ и ИК излучение от нагретых тел в вакуумной камере:

$$q_{m-w} = (q_s + q'_m) \cdot A_s \quad (14)$$

Здесь индексы «*m-w*» означают поток от зеркала на датчик,  $A_s$  – коэффициент поглощения поверхности датчика, тепловой поток от зеркал в месте расположения датчика,  $\text{Вт/м}^2$ .

Тепловой поток от датчика на криоэкраны определяется как

$$q_{m-inf} = \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_\infty^4) \quad (15)$$

где  $T_w$  температура поверхности датчика, К;  $T_\infty$  – температура криоэкранов, К;  $\varepsilon$  излучательная способность поверхности датчика. Очевидно, что для адиабатической стенки тепловые потоки (14) и (15) равны. При известных мощности ИСИ и температуре датчика с предположением о равенстве коэффициента поглощения и излучательной способности можно определить дополнительный поток, падающий на датчик:

$$q'_m = \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) - q_s \quad (16)$$

Для стационарного режима работы ИСИ температура датчика составила 126 °С, при этом тепловой поток от ИСИ на объект задан 1200 Вт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности криоэкранов равна -180 °С. Для приведенных условий дополнительный поток составит ~ 233 Вт/м<sup>2</sup>.

Расчет дополнительного потока производится методом трассировки лучей в программном пакете ZEMAX OpticStudio® на расчетной геометрии, показанной на рис. 4.

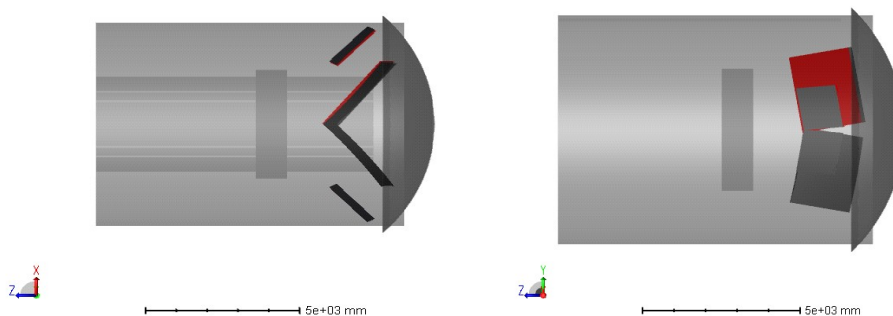


Рис. 4. Расчетная геометрия камеры МВУ.

На зеркалах задаются объемные источники тепла с учетом соотношения мощностей для рабочей и задней поверхностей.

Принципиальным моментом является учет теплового потока от самого объекта испытаний. Предполагается, что тепловое излучение от нагретого объекта испытаний отражается от зеркал и попадает назад на объект испытаний, внося тем самым вклад в дополнительный тепловой поток. На расстоянии 1 м от зеркал расположен объект испытаний. В расчете учитывается отражение от поверхности объекта, причем задаются как зеркальная, так и диффузная составляющие. Отношение зеркальной к диффузной составляющей 0,5/0,5.

Медианное значение температуры поверхности главного зеркала ИСИ в эксперименте составило +14 °С, максимальная температура +76 °С.

Медианное значение температуры поверхности вторичного зеркала ИСИ в эксперименте составило +165 °С, максимальная температура +224 °С.

Результаты численного моделирования теплового состояния главного и вторичного зеркал в пакете Ansys приведены на рис.5 и рис. 6 соответственно.

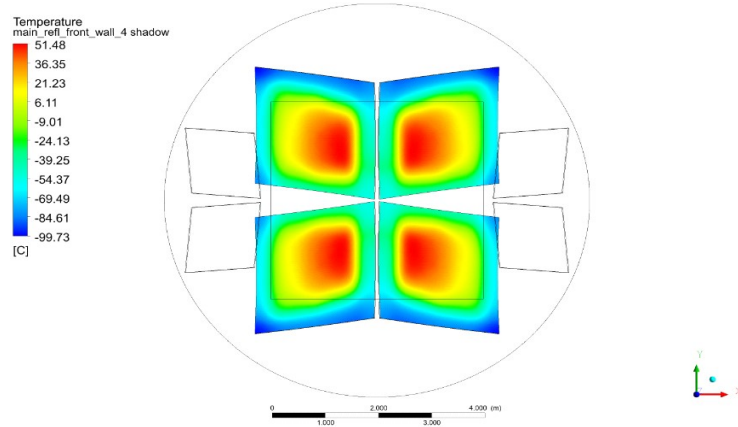


Рис. 5. Температура главного зеркала.

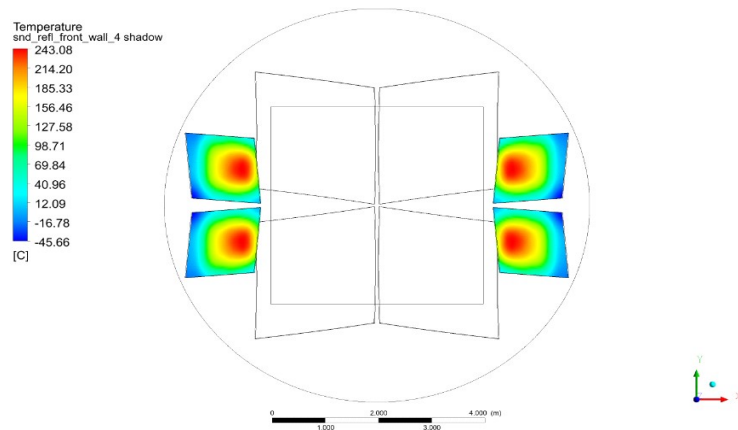


Рис. 6. Температура вторичного зеркала.

Максимальная температура передней поверхности главного зеркала +51,5 °С  
 Средняя температура поверхности главного зеркала +17,0 °С  
 Максимальная температура передней поверхности вторичного зеркала +243,0 °С  
 Средняя температура поверхности вторичного зеркала +243,0 °С

Таблица 2.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных

Параметр	Моделирование	Эксперимент
Температура главного зеркала (средняя), °С	+20.0	+14.0
Температура вторичного зеркала (средняя), °С	+170	+165.0
Температура главного зеркала (макс.), °С	+51.5	+76.0
Температура вторичного зеркала (макс.), °С	+243.0	+224.0
Дополнительный тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>	190	233

Таким образом, моделирование предсказывает примерно на 20 % меньшую величину дополнительного теплового потока по сравнению с экспериментальными данными. Данное различие можно объяснить неоднородностью граничных условий внутри экспериментальной установки, а также идеализациями, принятыми в расчетной модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена методика численного расчета тепловых потоков от нагретых элементов ИСИ при проведении ТВИ. Полученные значения сравниваются с экспериментальными данными.

Получено достаточно близкое совпадение результатов моделирования и эксперимента в части температуры поверхности зеркал; моделирование величины дополнительного теплового потока демонстрирует 20 % расхождение моделирования и эксперимента.

Получены данные по средним значениям термооптических характеристик зеркал ИСИ.

Рассмотрена методика измерения дополнительного потока с использованием датчика «адиабатическая стенка».

Методика демонстрирует хорошее совпадение результатов моделирования и экспериментальных данных. Дальнейшая доводка предложенной вычислительной модели и совершенствование методики эксперимента по измерению дополнительного теплового потока позволят использовать их для надежного прогнозирования величины дополнительного теплового потока при проектировании стендов ТВИ.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Григорьев В.А., Зорин В.М. (ред.). Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник., М.: Энергоатомиздат, 1982.— 512 с.: ил.
2. M.F.Modest., Radiative heat transfer. Second Edition. Academic Press. 2003