

## Измерение и расчет светового давления на конструкционные материалы

А.В. Афонасенко<sup>1</sup>, Ю.Э. Гейнц<sup>1</sup>, А.Н. Грицута<sup>1</sup>, А.В. Климкин<sup>1</sup>,  
С.В. Латынцев<sup>2</sup>, А.В. Овчинников<sup>2</sup>, К.Ю. Осипов<sup>1</sup>, И.В. Пташник<sup>1</sup>,  
А.А. Солодов<sup>1</sup>, А.М. Солодов<sup>1</sup>, Е.Н. Якимов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы»,

662972, г. Железногорск, ул. Ленина, 52

Поступила в редакцию 6.02.2020 г.

В работе представлены экспериментальная установка, эксперименты по измерению и расчет светового давления на конструкционные материалы для разных углов падения света. Расчет необходим для определения светотехнических свойств материала и суммарного момента сил солнечного давления. В качестве конструкционного материала использовался промышленный металлотрикотаж – сетеполотно. Для расчета было проведено более 4000 экспериментальных измерений коэффициентов пропускания и коэффициентов отражения сетеполотна.

*Ключевые слова:* давление света, сетеполотно, сетчатые антенны; light pressure, net-textile, mesh antennas.

### Введение

В настоящее время для обеспечения спутников радиосвязью часто используются гибкие сетчатые антенные комплексы, состоящие из параболических отражателей диаметром до десятков метров [1, 2], материалом для которых является сетеполотно. Поверхность таких антенн может составлять > 500 м<sup>2</sup> [3]. Крупногабаритная спутниковая антенна может действовать как солнечный парус, придавая космическому аппарату дополнительный механический импульс, величина которого будет изменяться в зависимости от пространственной ориентации космического аппарата по отношению к Солнцу [4, 5]. Сила солнечного света, действующая на поверхность рефлектора, сопоставима с номинальной тягой ионных двигателей спутника, и этот факт должен учитываться при проектировании космических аппаратов.

Расчет импульса светового давления должен базироваться на оптических характеристиках сете-

полотна, из которого изготовлен антенный рефлектор, в том числе его альбедо при различных углах падения светового излучения. При этом определение характеристик путем прямого измерения на стандартном спектроскопическом оборудовании [6] осложняется ячеистой структурой металлической сетки, у которой, как правило, > 80% поверхности – пустоты. Кроме того, сетеполотно, свитое из цилиндрической проволоки, характеризуется сильной анизотропией светового рассеяния, что вносит дополнительные сложности в процесс регистрации как прошедшего, так и отраженного излучения.

Полотно сложно сплетено методом «сетка в сетке», где «нити» крупноячеистой структуры сети представляют собой плетение мелкоячеистой структуры. Материал полотна – позолоченная молибденовая проволока двойного трикотажного плетения.

Для исследований были взяты два образца сетеполотна – эродированный и неэродированный. В реальных условиях эксплуатации антенны в космосе эрозия возникает под действием струй ионных двигателей, корректирующих полет космического аппарата. При таком воздействии разрушается и отслаивается от поверхности слой золотого покрытия сетеполотна.

### 1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (ЭУ) включает в себя серийный Фурье-спектрометр Брукер IFS 125HR (ФС) и специально разработанную измерительную приставку (ИП).

\* Анна Владимировна Афонасенко (aav@iao.ru); Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Алексей Николаевич Грицута (gan@iao.ru); Антон Владимирович Климкин (anton@iao.ru); Сергей Валерьевич Латынцев (lsv@iss-reshetnev.ru); Андрей Викторович Овчинников (a.v.ovchinnikov@iss-reshetnev.ru); Константин Юрьевич Осипов (osipov@iao.ru); Игорь Васильевич Пташник (piv@iao.ru); Александр Александрович Солодов (asolodov@iao.ru); Александр Михайлович Солодов (solodov@iao.ru); Евгений Николаевич Якимов (c9351@iss-reshetnev.ru).

ИП к ФС состоит из двух модулей. Первый включает в себя монтажный стол и коллимирующую оптику. Излучение от ФС собирается коллимирующей оптикой и направляется на исследуемый образец сетеполотна, размещенный во втором модуле и закрепленный в держателе. Держатель образцов, в свою очередь, закреплен в поворотном узле, состоящем из плиты, на которой установлены приводы горизонтальной и вертикальной осей вращения образца — моторизованные шаговые поворотные трансляторы Standa. Также в поворотный узел входит штанга, на которой размещен приемный блок. Расстояние между образцом и приемным блоком варьируется при помощи моторизованного шагового линейного транслятора Standa. Угол поворота штанги фиксируется флажковым стопором.

Для исследования светотехнических характеристик излучение ФС было выведено на внешнюю, описанную выше, ИП. Общая схема ЭУ приведена на рис. 1.

Излучение от ФС 1 с помощью коллимирующей оптики — вогнутого зеркала 2 — собирается в распространяющийся горизонтально пучок, имеющий в точке падения на образец 3  $\varnothing 5$  мм и расходимость  $\leq 3^\circ$ . Образец закреплен на поворотном

узле и может поворачиваться вокруг двух взаимноперпендикулярных осей (вертикальная ось  $O$  и горизонтальная ось  $O'$ ) на углы в пределах  $0-180^\circ$  от оси падения излучения  $A$ . Так обеспечивается наклон нормали  $C$  к плоскости образца на угол  $\alpha$ . Оси  $O$  и  $O'$  пересекаются в точке пересечения оси падающего излучения с образцом. Таким образом, при повороте образца центральная точка падения луча на него не изменяется, и при вращении относительно осей  $O$  и  $O'$  нормаль  $C$  описывает конус с вершиной в точке пересечения оси  $A$  и образца с углом раскрытия  $2\alpha$ , однако сам образец оси  $A$  не вращается. Нормаль  $C$  перемещается по конусу на угол  $\lambda$ , называемый в сферической системе координат долготой.

Ось  $B$  — оптическая ось приемного блока. Часть рассеянного образцом излучения попадает в приемный блок 4, где проецируется собирающей оптикой 4' на светочувствительную площадку фотодетектора 4". Собирающая оптика обеспечивает перехват отраженного от образца излучения в угле  $\leq 0,1$  ср. Приемный блок поворачивается вокруг оси  $O$  на угол  $\beta$  от оси  $A$  таким образом, что пятно рассеянного на нем излучения всегда проецируется

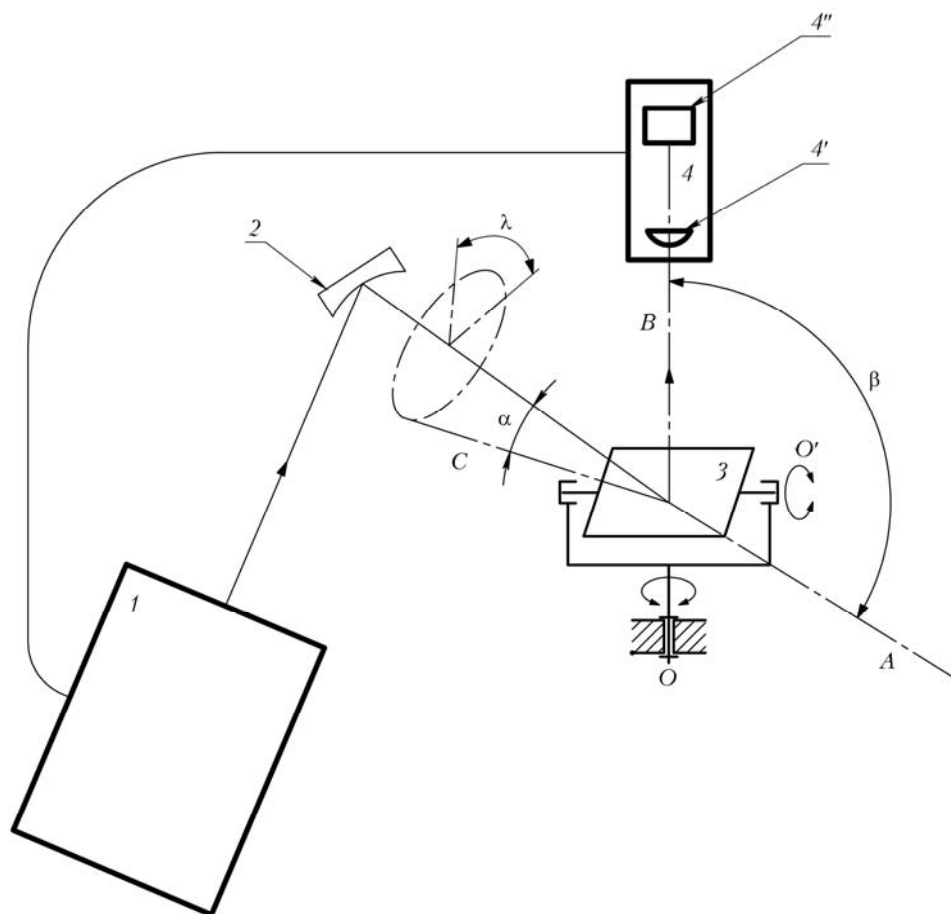


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — Фурье-спектрометр; 2 — коллимирующая оптика; 3 — исследуемый образец на поворотном узле; 4 — приемный блок (4' — собирающая оптика, 4" — фотоприемник);  $A$  — оптическая ось падающего на образец излучения;  $B$  — оптическая ось отраженного или пропущенного образцом излучения, перехватываемого приемным блоком;  $C$  — нормаль к плоскости образца;  $\alpha$  — угол отклонения нормали  $C$  от оси  $A$ ;  $\beta$  — угол отклонения оси  $B$  от оси  $A$ ;  $\lambda$  — долгота

на приемную площадку фотодетектора. В измерениях использовались фотоприемники с увеличенной приемной площадкой (3 × 3 мм), чтобы обеспечить полный перехват падающего излучения. Приемный блок поворачивается на угол от 10 до 180° от оси падающего на образец излучения. Принятый приемным блоком сигнал передается в ФС.

## 2. Экспериментальные исследования

Измерения пропускания сетки и отраженного от нее излучения проводились по одной и той же методике: сначала измерялся опорный сигнал (без сетки), затем — сигнал с сеткой, установленной в определенные угловые положения. Отношение этих сигналов дает абсолютное значение величины пропускания или отражения. Исходя из конструктивных особенностей сетеполотна была сделана оценка его отражательной способности, в соответствии с которой отраженное излучение должно было быть слабее падающего примерно на четыре-пять порядков. Для регистрации столь слабого отраженного сигнала использовалась полная мощность излучения, выходящего из Фурье-спектрометра, а для регистрации опорного сигнала применялись абсорбционные светофильтры, которые предотвращали насыщение светочувствительной площадки фотоприемников и операционных усилителей. Характеристики светофильтров были измерены на этой же установке с погрешностью < 1% и в дальнейшем использовались для восстановления величины опорного сигнала.

Для определения **коэффициента пропускания** приемный блок заводился за держатель поворотного узла таким образом, чтобы падающее излучение, прошедшее через пустой держатель и соответствующий светофильтр, попало в приемный блок ( $\beta = 0^\circ$ ). Производилась настройка положения приемного блока относительно луча на максимальное значение сигнала, регистрируемое фотоприемником. Этот же сигнал использовался как опорный. Затем образец устанавливался в поворотный узел и разворачивался перпендикулярно падающему лучу. Измерялся начальный сигнал, ослабленный объектом. Из отношения этого сигнала к опорному находилось абсолютное значение коэффициента пропускания объекта при заданном угловом положении. Подобным образом проводились измерения при последовательном изменении угла отклонения нормали  $C$  (см. рис. 1) от оптической оси падающего излучения  $A$  (угол  $\alpha$ ) в пределах от 90 до 15° с шагом  $\lambda = 15^\circ$ .

Для определения **коэффициента отражения** приемный блок устанавливался в положение наименьшего возможного для ИП угла по отношению к падающему лучу ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 165^\circ$  на рис. 1). Проводилось одно измерение, так как нормаль  $C$  совпадала с осью  $A$ . Задавался угол  $\alpha = 15^\circ$ , и проводились 24 измерения с шагом  $\lambda = 15^\circ$  вокруг оси  $A$ . Далее задавался угол  $\alpha = 30^\circ$ , снова проводились 24 измерения с шагом  $\lambda = 15^\circ$  вокруг оси  $A$ . Угол  $\beta$

уменьшался на 15°, и повторялись измерения для  $\alpha = 0^\circ$ , 15° и 30°. Циклы измерений продолжались до достижения  $\beta = 15^\circ$ .

Измерения проводились в диапазоне  $3900 \div 26500 \text{ см}^{-1}$  (375 ÷ 2800 нм) со спектральным разрешением  $20 \text{ см}^{-1}$ . В таблице приведены комплектующие ФС, используемые в трех различных участках этого диапазона.

Комплектующие Фурье-спектрометра, используемые в различных спектральных интервалах

Диапазон, $\text{см}^{-1}$	Источник излучения	Приемник излучения	Светоделитель
3900 ÷ 9000	галогеновая лампа 50 Вт	InGaAs	CaF <sub>2</sub>
9000 ÷ 17000	галогеновая лампа 50 Вт	Si	SiO <sub>2</sub>
26490 ÷ 26500	светодиод	GaP	УФ-кварц

Для эродированного и неэродированного образцов исследования осуществлялись по одной методике. Так как при подготовке эродированного образца ионный двигатель воздействовал на него с одной стороны под углом 45° к плоскости полотна, измерения для него проводились с двух сторон.

Таким образом был получен набор коэффициентов пропускания сетеполотна при последовательном изменении через 15° угла отклонения падающего светового потока от нормали к плоскости образца от 0 до 75°, а также набор коэффициентов отражения при последовательном изменении через 15° угла отклонения падающего светового потока от нормали к плоскости образца от 0 до 30°.

Измерения проводились для структурного элемента сетеполотна в виде перекрестья размером 14 × 14 мм и усреднялись для 10 соседних перекрестий. Всего было выполнено более 4000 измерений. Пример регистрации отраженного от сетеполотна и восстановленного опорного сигналов приведен на рис. 2. Полученный при этом спектр отражения сетеполотна показан на рис. 3.

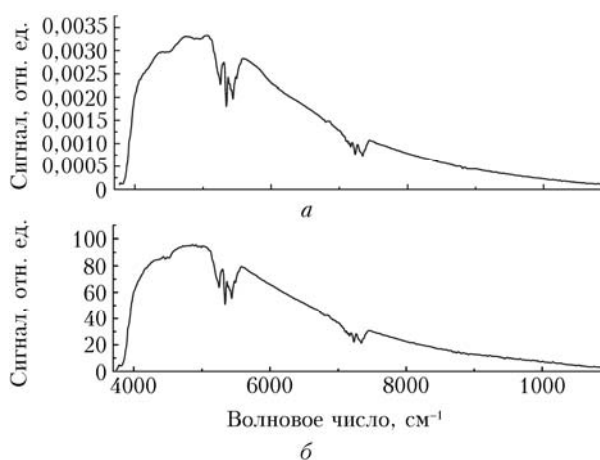


Рис. 2. Зарегистрированный отраженный от образца сигнал ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,  $\lambda = 120^\circ$ ) (а); восстановленный опорный сигнал (б)

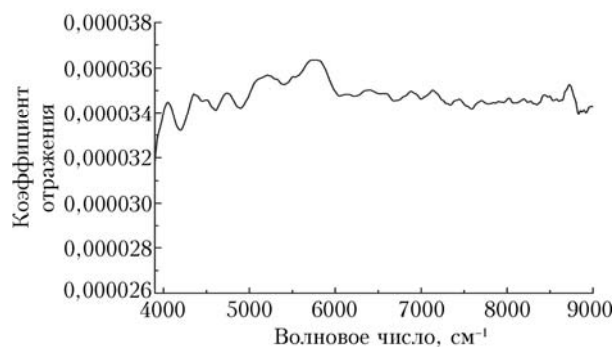


Рис. 3. Пример спектра отражения сетеполотна

При углах падения излучения на образец, отличных от нормали к плоскости образца более чем на  $\alpha = 30^\circ$ , в пучок падающего излучения попадали соседние перекрестья, внося неопределенность в дальнейшие вычисления. Для решения этой проблемы была создана математическая модель сетеполотна, и все вычисления для углов падения более  $30^\circ$  проводились для модели. Верифицировалась модель по результатам измерений, выполненных для углов падения в пределах  $\alpha = 30^\circ$ .

Построение модели, ее калибровка и верификация, методика расчета светового давления, результаты расчетов подробно описаны в [7].

### 3. Определение светового давления на поверхность образца, оказываемого оптическим источником, имитирующим спектр солнца

Расчеты светотехнических характеристик сетеполотна велись на основе данных математического моделирования пропускания и отражения [7]. Компьютерная модель сетеполотна, откалиброванная по экспериментальным данным, использовалась для расчета параметров светорассеяния и светового давления в требуемом диапазоне сферических углов.

При расчетах давления отраженное излучение аккумулировалось в телесном угле  $0,054$  ср с угловым шагом  $15^\circ$ . Пропускание рассчитывалось для излучения, прошедшего по всей полусфере за образцом. Поглощение вычислялось как разность между полной мощностью падающего на сетеполотно излучения и суммой мощностей прошедшего и отраженного излучения. Полученные значения коэффициентов усреднялись по двум различным вариантам пространственной ориентации образца относительно плоскости падения излучения.

Плотность потока солнечного излучения на расстоянии одной астрономической единицы принималась равной табличному значению  $1367 \text{ Вт/м}^2$ , что дает реперное давление света  $9,12 \text{ мкН/м}^2$  при нормальном падении на полностью отражающую

поверхность. По результатам численного моделирования, максимальное значение давления солнечного излучения на сетеполотно не превышает  $\sim 3\%$  его реперного значения, составляя, с учетом погрешности моделирования ( $20\%$ ),  $\sim 0,28 \pm 0,06 \text{ мкН/м}^2$ . При этом максимальное давление на  $\sim 5\%$  ниже для эродированного сетеполотна при его освещении со стороны ионного потока. Для обратной стороны эродированного сетеполотна никаких заметных отличий в коэффициентах светорассеяния и давления по отношению к неэродированному сетеполотну не обнаружено.

### Заключение

В результате проведенных измерений, моделирования и расчетов было получено, что максимальное давление солнечного света сетеполотно испытывает при нормальном угле падения излучения на полотно, а его величина при диаметре антенны, например,  $10 \text{ м}$  будет составлять  $\sim 10 \text{ мкН}$ . Несмотря на незначительность давления, его длительное воздействие может привести, например, к вращению космического аппарата.

Была создана математическая модель для расчета светового давления, оказываемого широкополосным источником электромагнитного излучения со спектральным составом солнечного света, на сетеполотно спутниковой антенны. Модель позволяет сократить число экспериментальных исследований до минимально необходимого для ее верификации.

Созданная установка и компьютерная модель могут быть использованы в оптических расчетах для различного типа промышленного металлотрекотажа, частично прозрачных и плоских конструкционных материалов при достаточно ограниченном числе экспериментальных измерений.

1. Kennedy T.F., Fink P.W., Chu A.W., Champagne N.J., Lin G.Y., Khayat M.A. Body-worn e-textile antennas: The good, the low-mass, and the conformal // IEEE Trans. Antennas Propag. 2009. V. 57, N 4. P. 910–918.
2. Dias T., Hurley W., Monaralgala R., Wijeyesiriwardana R. Development of electrically active knitted textiles // Adv. Sci. Technol. 2008. V. 60. P. 74–84.
3. Scialino L., Ihle A., Migliorelli M., Gatti N., Datashvili L., van Klooster K., Santiago Prowald J. Large deployable reflectors for telecom and Earth observation applications // CEAS Space J. 2013. N 5. P. 125–146.
4. Farres A., Jorba A. Periodic and quasi-periodic motion of a solar sail close to SL1 in the Earth-Sun system // Celest. Mech. Dyn. Astron. 2010. V. 107. P. 233–253.
5. Макарова Е.А. Физика космоса. М.: Советская энциклопедия, 1986. С. 627.
6. Mironov R.A., Reznik S.V., Rukavishnikov R.V., Shishulina V.A., Zavaruev V.A. Optical characterisation of metallic meshes for space antennas transformable reflectors // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016. V. 153. CID 012013.
7. Geints Yu.E., Klimkin A.V., Latynsev S.V., Ovchinnikov A.V., Ptashnik I.V., Solodov A.A., Solodov A.M., Yakimov E.N. Geometrical-optics computer

*A.V. Afonassenko, Yu.E. Geints, A.N. Gritsuta, A.V. Klimkin, S.V. Latyntsev, A.V. Ovchinnikov, K.Yu. Osipov, I.V. Ptashnik, A.A. Solodov, A.M. Solodov, E.N. Yakimov.* **Measurement and calculation of light pressure on structural materials.**

The paper presents an experimental setup, experiments on measuring and calculation of light pressure on structural materials for different angles of incidence of light. This calculation is necessary to determine the materials lighting properties and the total forces moment of solar pressure. As a construction material, industrial metal fiber (net-textile) was used. Net-textile is the material of large-diameter spacecraft antennas. More than 4 000 experimental measurements of the transmittance and reflection coefficients of net-textile were carried out for the calculation.