по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – Т. 7. – С. 103–105.

- Иванов В. В., Шкребко С. В. Моделирование тепловых процессов подземных бесканальных теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – Т. 7. – С. 106–108.
- 14. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Тепловые потери бесканальных теплотрасс в условиях промерзания грунта в зоне прокладки // Известия вузов. Проблемы энергетики. - 2012. - №11-12. С. 64-71.
- 15. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. М.: Госстрой России, 2000. 57 с.
- Гува А. Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.
- 17. Агапкин В. М., Кривошеин Б. Л., Юфин В. А. Тепловой и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1981. – 256 с.

УДК 536.2:539.3

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕФЛЕКТОРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Пономарев В.С.^{1,2}, Герасимов А.В.^{1,2}, д.ф.-м.н., Пономарев С.В.², д.ф.-м.н, Шендалев Д.О.³, к.т.н., Попов А.В.³ ¹Томский политехнический университет, г. Томск, ²НИИПММ Томского государственного университета, г. Томск,

³ОАО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева», г. Железногорск

E-mail: vsponomarev@niipmm.tsu.ru

Разработка систем связи для высокочастотных лиапазонов приводит к необходимости создания антенн космического назначения с отражающей поверхностью (ОП), имеющей среднеквадратическое отклонение (СКО) порядка 10⁻⁵ метра. Таким точностям удовлетворяют рефлекторы. прецизионные изготавливаемые ИЗ полимерных композиционных материалов. Кроме высокой точности подобные рефлекторы имеют малый вес и соответственно высокие динамические характеристики ПО сравнению с аналогичными рефлекторами, металлов. Прецизионные рефлекторы имеют изготовленными ИЗ размеры, ограниченные размером обтекателя ракета-носителя.

Наряду с жесткими прецизионными рефлекторами на космических аппаратах (КА) используются крупногабаритные развертываемые рефлекторные космические антенны. На трансформируемые рефлекторы с увеличенной апертурой также накладываются требования по массе, жесткости и точности ОП (СКО порядка 5⁻³ м).

Точность ОП обоих видов рефлекторов помимо изначально заложенной величины СКО, связанной с неточностями при

изготовлении, сборки и особенностью конструкции, зависит от температурных деформаций вследствие неравномерного распределения градиента температур при эксплуатации в открытом космосе. Поэтому для каждой концепции рефлектора космического назначения важно исследование термомеханического поведения.

В основном тепловой режим рефлектора определяется солнечным излучением, дополнительно за счет потоков солнечного излучения отраженных от Земли, за счет собственного инфракрасного излучения Земли, а также за счет отраженного от элементов конструкции КА солнечного излучения.

Для решения задачи нахождения распределения температуры в элементах конструкции использовался метод конечных элементов (КЭ). Для каждого КЭ составляется уравнение теплового баланса вида:

 $(c_m)_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = Q_i^{ext} + Q_i^{int} + \sum_j \left(\lambda \frac{F}{\delta}\right)_{j-1} (T_j - T_i) + \sum_k \varepsilon_i H_{i-k} \sigma(T_k^4 - T_i^4),$ где $(c_m)_i$ – теплоемкость, Q_i^{ext} – внешний тепловой поток на i-ый расчётный узел, Q_i^{int} – внутреннее тепловыделение в i-ом расчётном узле, $\lambda \frac{F}{\delta}$ – коэффициент, характеризующий кондуктивную связь i-ого с j-ым расчётными узлами, ε_i – степень черноты i-го узла, H_{i-k} – поверхность взаимного лучистого обмена между i-ым и k-ым расчётными узлами, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ BT/(м²·°C⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

Для решения полученной системы уравнений используются имеющиеся стандартные или специальные компьютерные программы, такие как Siemens NX.

Математическая тепловая модель конструкции рефлектора включает конечное число изотермических узлов, связанных между собой тепловыми связями, определяемыми конструктивным исполнением расчетного узла. В тепловой модели учитываются:

• кондуктивный теплообмен между узлами конструкции антенны,

• теплообмен переизлучением между узлами конструкции антенны.

Для каждого узла тепловой модели записывается уравнение теплового баланса. Система уравнений, дополненная граничными и начальными условиями, полностью описывает тепловую модель. Солнечный поток Q_{solar} , поступающий на единичную площадку конструкции, имеет вид:

$$Q_{solar} = A_s \cdot S_0,$$

где A_s – коэффициент поглощения солнечного излучения, S_0 – солнечная постоянная, величина которой варьируется в течение года от 1320 Вт/м² до 1420 Вт/м². Поток от инфракрасного излучения Земли

$$Q_{earth} = Q_{IR} \cdot \varepsilon \cdot \sin^2 \rho$$
,

где Q_{IR} – инфракрасное излучение Земли (237±21 Вт/м²), ε – коэффициент излучения (степень черноты), $\sin^2 \rho = R_E/(h + R_E)$, R_E – радиус Земли, h – высота орбиты объекта. Тепловые потоки Q_{ref} , отраженные от Земли

$$Q_{ref} = S_{max} \cdot A_s \cdot a \cdot K_a \cdot \sin^2 \rho,$$

где *а* – Альбедо, *K_a* – корректирующий коэффициент для отражения солнечной энергии со сферы Земли.

Тепловой анализ рефлекторов был проведен для двух крайних расчетных случаев весеннее равноденствие ($S_0 = 1380 \text{ Bt/m}^2$) и зимнее солнцестояние ($S_0 = 1420 \text{ Bt/m}^2$). Для расчетного случая в точке весеннего равноденствия (TBP) учитывалась тень от Земли на сегменте орбиты продолжительностью 72 минуты. Все расчеты проведены для отрезка времени в 24 часа с шагом по витку орбиты в 10 минут.



Рис. 1. Положения рефлектора на геостационарной орбите Земли (*a*) – *ТВР, (б*) – *ТЗС.*

После полученные в результате теплового анализа массивы температур использованы в качестве граничных условий для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС).

Исследовано термомеханическое поведение на геостационарной орбите Земли двух конструкций рефлекторов: прецизионного с диаметром аппретуры 1.8 м и крупногабаритного рефлектора на штанге с диаметром аппретуры 50 м. На рисунке 1 представлены КЭ модели для анализа НДС рефлекторов. Тепловые КЭ модели были построены в соответствии с КЭ моделями для НДС, однако В модели крупногабаритного рефлектора был принят ряд упрощений. Каждая модель имеет свои конструктивные особенности, реализация которых успешно осуществлена при помощи возможностей построения и параметризации модели в программном комплексе ANSYS.

Так модель крупногабаритного рефлектора содержит помимо жестких элементов, выполняющих роль силового каркаса, металлическое сетеполотно, формирующее ОП рефлектора, набор

шнуров, позволяющих за счет натяжения усилить каркас, набор веревочных элементов, образующих фронтальную и тыльную сети и шнуры, так называемые оттяжки, поддерживающие параболическую форму ОП.



Модель прецизионного рефлектора, представляющего собой сэндвич панель из сотозаполнителя и двух углепластиковых «чашек», учитывает ортотропные свойства и направление выкладки материалов.



Рис. 3. Графики почасового изменения СКО (а) – крупногабаритный рефлектор; (б) – прецизионный рефлектор.

После проведения подготовительных расчетов, используя возможность перезапуска, определялось НДС под действием температурных нагрузок, производился расчет СКО И радиотехнических характеристик по смещенным узлам ОП рефлекторов.

Для каждого рефлектора были построены графики почасового изменения СКО, представленные на рисунке 3.

Из графиков определены положения рефлекторов с наихудшим СКО и по массивам координат узлов ОП рассчитаны диаграммы направленности.

Таким образом, с использованием средств и возможностей программных комплексов ANSYS и Siemens NX проанализировано термомеханическое поведение конструкций рефлекторов на основе композиционных материалов для исследования возможности их использования на геостационарной орбите Земли.

теплового анализа Результаты показывают применимость конструкции углепластиковых композитов ДЛЯ элементов прецизионных СКО рефлекторов рефлекторов. Величины при максимальных искажениях ОП от температурных деформаций не превышает требуемых величин для данных конструкций.

УДК 532.591

МЕТОД СИНХРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВОЛНОВОГО ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ

Рахманов В.В. к.т.н., Кабардин И.К., Двойнишников С.В., к.т.н. Институт теплофизики, г. Новосибирск E-mail: <u>rahmanov@oit.itp.nsc.ru</u>

Волновые пленочные течения широко используются в технологических процессах. За счет низкого теплового сопротивления и большой поверхности контакта при малых удельных расходах применение пленок жидкости является эффективным средством в процессах межфазного тепломассообмена, конденсации и испарения. Частным случаем пленочного течения является течение пленок по поверхности вращающегося диска. Волны, возникающие на поверхности пленки, могут приводить к интенсификации массообмена. Несмотря на наличие большого количества методов измерения толщины пленок, используемых в настоящее время [1, 2], первичная визуализация течения является актуальной задачей, позволяющей убедиться в правильности выбранного подхода к формированию волнового пленочного течения.

Цель данной работы заключалась в разработке метода синхронной визуализации волнового пленочного течения на поверхности вращающегося диска.

При визуализации волновых пленочных течений часто возникает задача получить картину течения с синхронизацией, связанной со скоростью вращения диска или с пульсациями давления в подводимой жидкости. Наиболее распространены и доступны цифровые видео- и