

### Литература

1. Трохин В.Е., Трынкина Л.В., Казаков А.А., Бессарабов А.М. Разработка информационного CALS-проекта гибкой технологии соляной и плавиковой кислот особой чистоты // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4 (62), вып.4. С. 253-257.
2. Бессарабов А.М., Вендило А.Г., Трохин В.Е., Попов А.К., Казаков А.А., Рябенко Е.А., Кочетыгов А.Л. CALS-система для проектирования промышленного производства хлорной и азотной кислоты особой чистоты // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 2. С. 1-7.
3. Trokhin V.E., Vendilo A.G., Bessarabov A.M., Kazakov A.A., Stepanova T.I. Use of the CALS concept for development of equipment modules producing reagent-quality aliphatic hydrocarbons // Chemical and Petroleum Engineering. 2012. Vol. 48, № 5-6. P. 271-277.
4. Глушко А.Н., Бессарабов А.М. Разработка CALS-системы компьютерного менеджмента качества пропиточных составов для дорожных покрытий // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 2, № 3 (17). С. 91-94.

### **Алгоритм определения освещенности солнечных батарей Российского сегмента Международной космической станции**

к.ф.-м.н. доц. Сазонов В.В.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
8(495)930-52-87*

*Аннотация.* Рассматривается задача определения освещенности солнечных батарей Российского сегмента Международной космической станции, которая является одной из основных задач, возникающих при математическом моделировании системы электропитания Российского сегмента Международной космической станции. В работе представлено законченное решение: подход к заданию внешней поверхности МКС при помощи геометрического моделирования ее положения в пространстве относительно Земли и Солнца, способ задания конструкции солнечных батарей и устойчивый алгоритм определения освещенных участков солнечных батарей, основанный на методе трассировки лучей.

*Ключевые слова:* геометрическое моделирование, трассировка лучей, Международная космическая станция, математическое моделирование

**Введение.** Система электропитания (СЭП) Российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС) представляет собой сложный технический объект с непростою логикой работы. Выработка электроэнергии осуществляется солнечными батареями (СБ), установленными на служебном модуле (СМ) РС МКС, когда станция пролетает по участку своей орбиты, освещаемому Солнцем. Этот участок орбиты составляет не менее половины витка, МКС совершает виток за ~90 минут. Бортовое питание РС МКС осуществляется от бортовых аккумуляторов, которые подзаряжаются при помощи СБ.

Проведение экспериментов на борту МКС и выполнение ряда других операций, связанных с полетом станции, зачастую требует больших затрат электроэнергии, и планирование работ экипажа существенным образом зависит от работы СЭП, поэтому задача математического моделирования работы СЭП является актуальной.

СБ состоят из набора фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), каждый из которых является элементарным источником постоянного тока, с номинальной ЭДС в несколько вольт. ЭДС, вырабатываемая ФЭП, зависит от многих факторов [1]. Упрощенно можно представить функцию ЭДС в следующем виде:

$$E_{i,j} = E_{i,j}^0 \cdot k_{разб}(i,j) \cdot k_{дегр}(t) \cdot k_{мм}(i,j,t) \cdot k_{экс}(t) \cdot k_{тень}(i,j,t) \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

где  $E_{i,j}^0$ , В – ЭДС ФЭП, осредненная по всем образцам, при условии освещения отвесными лучами, на среднем расстоянии до Солнца, без учета деградации и повреждений микрометеороидами;

$k_{разб}(i)$  – коэффициент разброса характеристик ФЭП в зависимости от образца, для каждой пары  $(i, j)$  коэффициент представляет собой реализацию некоторой случайной величины с нормальным законом распределения, мат. ожидание которой равно 1, а с.к.о.  $\sigma$  задано величиной от 0,01 до 0,05;

$k_{дегр}(t)$  – коэффициент деградации ФЭП, равен 1 в момент времени  $t = 0$ , отсчитываемом от начала службы модуля, а далее экспоненциально снижается на заданное количество процентов в год (от 2 до 7 %);

$k_{мм}(i, j, t)$  – коэффициент снижения эффективности ФЭП в результате повреждения микрометеороидами. В момент начала службы модуля, при  $t = 0$ , для всех  $(i, j)$  коэффициент равен 1. Далее, по мере службы, в случайной зависимости от времени и номера  $(i, j)$  некоторые коэффициенты должны принимать значение от 0 до 1, конкретный выбор которого также является реализацией некоторой случайной величины. Соответствующие законы распределения предоставляются РКК «Энергия».

$k_{экс}(t)$  – коэффициент изменения яркости Солнца из-за эксцентricности орбиты Земли. Равен 1, когда Земля находится на среднем расстоянии от Солнца (среднее между минимальным и максимальным);

$k_{тень}(i, j, t)$  – коэффициент снижения ЭДС ФЭП в результате затенения. Равен 1, если тень отсутствует и равен доле освещенной части поверхности ФЭП.

$\theta$  – угол падения солнечных лучей на поверхность ФЭП (угол между направлением на Солнце и нормалью к плоскости консоли СБ).



Рисунок 1. Конфигурация МКС

Существенной и весьма трудоемкой задачей является определение коэффициента снижения ЭДС ФЭП в результате затенения, о решении этой задачи и пойдет речь в этой работе.

**Постановка задачи.** Требуется в каждый момент времени полета МКС определять мгновенную мощность, вырабатываемую СБ. Для этого в каждый заданный момент времени требуется определить:

- положение МКС относительно Земли и Солнца,
- положение подвижных элементов МКС,
- коэффициенты снижения ЭДС в результате затенения для каждого ФЭП.

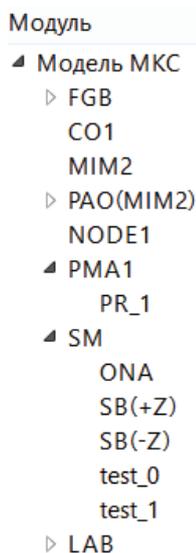
Вопрос математического моделирования работы СЭП полностью в настоящей работе не рассматривается, внимание уделяется только указанным выше трем вопросам.

**Определение положения МКС относительно Земли и Солнца.** Движение МКС во время полета достаточно сложное, можно его представить суперпозицией движений: поступательного движения центра масс (движения по орбите) и движения относительно центра масс.

Для точного прогноза орбиты необходимо учитывать неоднородность геопотенциала Земли и сопротивление атмосферы. МКС совершает полет на высоте около 400 км, на этой высоте атмосфера оказывает заметное влияние на полет, поэтому его необходимо учитывать [2]. Для определения орбиты МКС численно интегрируется система обыкновенных дифференциальных уравнений, используется явная схема интегрирования Дормана-Принца 8 порядка аппроксимации [3].

Начальные данные для интегрирования, так называемый восходящий узел, можно получить при помощи системы NORAD или от Главной оперативной группы управления (ГОГУ) МКС, также ГОГУ предоставляет данные для моделирования сопротивления атмосферы.

В рамках представляемой работы разработана **геометрическая модель внешней поверхности МКС**.



**Рисунок 2. Структура геометрической модели МКС**

МКС представляет собой сложную конструкцию, площадь внешней поверхности которой составляет около 1 га. ФЭП, входящие в состав СБ РС МКС, могут затеняться Землей и элементами конструкции МКС, расположенными на ее внешней поверхности, поэтому для определения затенения СБ требуется иметь достаточно подробную геометрическую модель внешней поверхности МКС.

МКС обладает набором подвижных элементов: радиаторами, элементами приводов СБ, панелями СБ. Положение подвижных элементов зависит от текущего положения МКС и

постоянно меняется. Кроме того, состав МКС в течение времени меняется: пристыковываются и отстыковываются космические корабли, добавляются новые модули. Разработанная геометрическая модель внешней поверхности МКС позволяет задавать произвольные конфигурации МКС и положение подвижных элементов. Кроме того, разработанная геометрическая модель позволяет добавлять модели новых модулей, поддерживая геометрическую модель в актуальном состоянии.

Разработанная геометрическая модель МКС является совокупностью:

- усеченных конусов,
- прямоугольных параллелепипедов,
- плоских четырехугольников,
- треугольников.

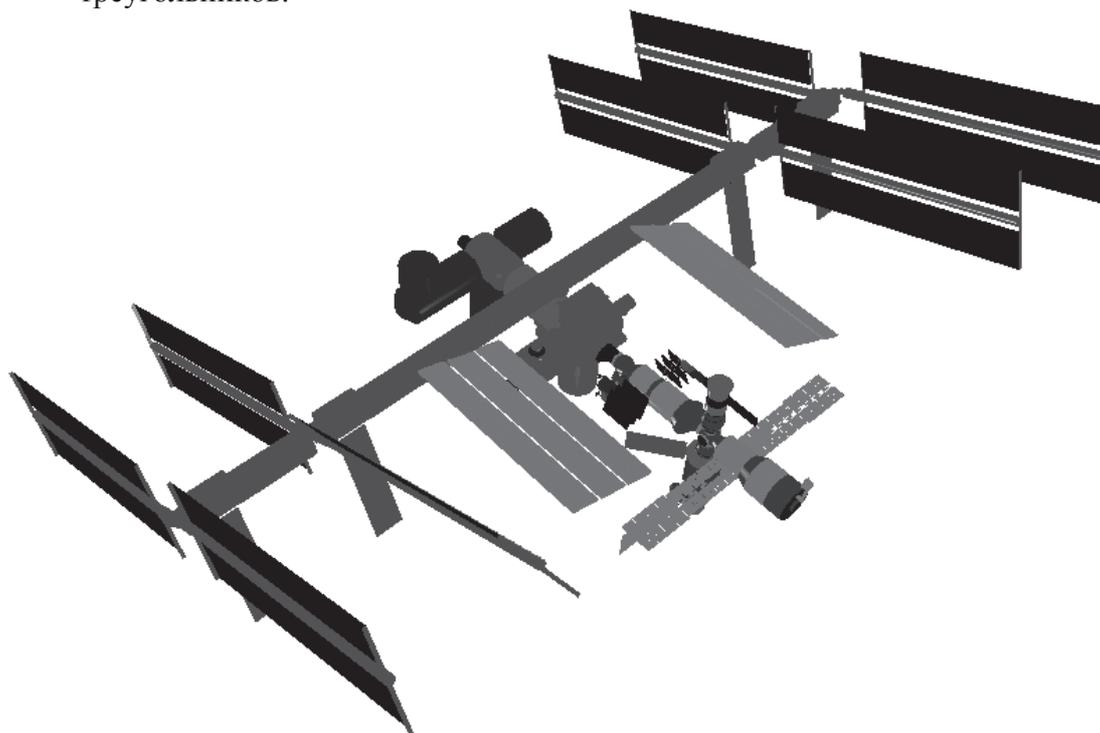


Рисунок 3. Геометрическая модель МКС

Примитивы объединяются в группы, группы объединяются в древовидную структуру, каждый узел дерева имеет свое смещение и ориентацию относительно своего родителя. Таким образом, изменяя ориентацию заданных узлов МКС, можно задавать вращение подвижных элементов.

Треугольники объединяются в т.н. триангуляции, четырехугольники как входят отдельно в модель, так и входят в состав моделируемых СБ.

Модель СБ представляет собой совокупность плоских прямоугольников, находящихся в общем случае в разных плоскостях. Задача определения коэффициента затенения ФЭП эквивалентна задаче отыскание освещенных участков прямоугольников, моделирующих ФЭП в геометрической модели МКС.

Некоторые элементы конструкции сложной формы, такие как манипулятор ERA, моделируются триангуляциями. Программная геометрической модели МКС позволяет подгружать триангуляции в формате OBJ и STL.

**Положение подвижных элементов** можно получать от ГОГУ или моделировать.

СБ РС МКС вращаются вокруг продольной оси с шагом в 22,5 градуса, минимизируя угол между нормалью к плоскости СБ и направлением на Солнце.

СБ Американского сегмента (АС) МКС вращаются с шагом в 1 градус в двух плоскостях, минимизируя угол между нормалью к плоскости СБ и направлением на Солнце, но есть и другие соображения. Из-за больших размеров батарей АС возникает проблема перекоса из-за термической деформации, поэтому требуется также обеспечивать равномерный нагрев СБ. Полностью алгоритм НАСА не раскрывает, но предоставляет данные ГОГУ.

Радиаторы всегда стараются направить параллельно направлению на Солнце, чтобы уменьшить их нагрев.

**Определение коэффициента затенения ФЭП** производится методом, основанным на трассировке лучей [4]. Прямоугольник (размером ~ 3 см x 5 см), моделирующий ФЭП разбивается регулярной сеткой на прямоугольники размером не больше, чем 1 см x 1 см. Из центра каждой ячейки испускается луч в направлении на Солнце и ищутся пересечения этого луча с примитивами геометрической модели МКС и с геоидом, моделирующим Землю. Если найдено хотя бы одно пересечение, то участок ФЭП считается затененным, если пересечений не найдено, то рассматриваемый участок ФЭП считается освещенным. Коэффициент затенения вычисляется отношением  $k_{\text{тень}}(i, j, t) = \frac{N_{\text{освещ}}}{N_{\text{общ}}}$  количества освещенных ячеек ФЭП

$N_{\text{освещ}}$  к общему числу ячеек  $N_{\text{общ}}$ .

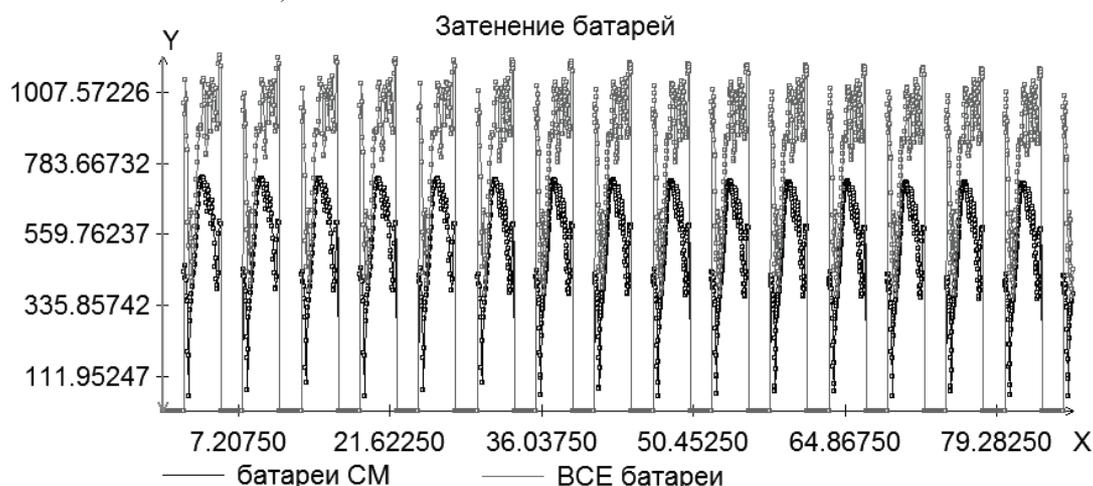
Для получения качественного прогноза выработки электроэнергии необходимо считать освещенность СБ с интервалом не более 1,5 минут, то есть 60 раз за виток и, соответственно не менее 960 раз за сутки. Трассировка лучей считается медленной техникой, поэтому для ускорения расчетов приходится использовать различные оптимизации.

Перед расчетом затенения каждой СБ определяется набор примитивов, проекции которых на плоскость солнечной панели (плоского участка СБ) пересекаются с прямоугольником солнечной панели.

При определении пересечения с триангуляциями используется метод регулярной трехмерной сетки [5], построение и использование регулярной трехмерной сетки описано в [6].

Разработанная программная реализация представленного метода производит расчет на сутки с интервалом в 1 минуту менее, чем за 1 минуту (8 потоков, процессор Intel Core I7).

**Программная реализация.** Программное обеспечение разрабатывается при поддержке ОАО РКК "Энергия" имени С.П. Королева и министерства образования и науки России (грант МК-5734.2014.9).



**Рисунок 4. Пример расчета коэффициента затенения СБ на сутки**

Разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать полет МКС, точно воспроизводить ее конфигурацию, положение подвижных элементов и определять мощ-

ность СБ РС МКС в любой момент времени. Ниже приводятся примеры расчетов освещенности СБ на сутки 10:50 30.04.2013 - 10:50 01.05.2013 г. и на 2,5 витка 10:50 30.04.2013 - 14:50 30.04.2013 г. В расчетах участвуют СБ работающего на данный момент СМ РС МКС и перспективного Малого лабораторного модуля (МЛМ), чей полет запланирован на 2015 год.

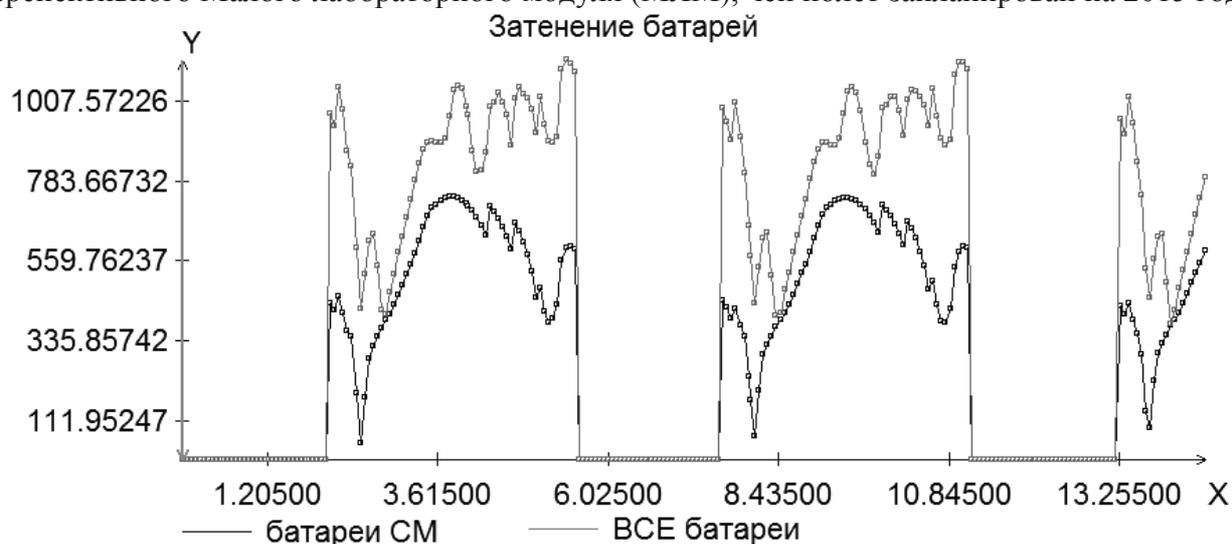


Рисунок 5. Пример расчета коэффициента затенения СБ на 4 часа

#### Литература

1. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика. Учебное пособие для ВУЗов. - М.: Издательские дом МЭИ, 2008.
2. ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры.
3. Dormand, J. R.; Prince, P.J. A family of embedded Runge-Kutta formulae //Journal of Computational and Applied Mathematics. N 6 (1), 1980 pp.19–26.
4. Glassner A.S., et al. An Introduction to Ray Tracing / Academic Press, London, 1989.
5. Glassner A.S. Space subdivision for fast ray-tracing / IEEE C.G. & A., 1984, v.4(10), p.15-22.
6. Медведев С., Сазонов В., Сайгираев Х. Моделирование зон неустойчивой работы радиотехнической измерительной системы с активным ответом во время сближения и стыковки космических кораблей с Международной космической станцией // Математическое моделирование. — 2012. — Т. 24, № 2. — С. 151–160.

### **Изучение дыхательной активности илов различных технологических процессов биологической очистки**

К.т.н. доц. Веригина Е.Л.<sup>1</sup>, к.с.-х.н. Грачев В.А.<sup>2</sup>, Селиванов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет машиностроения

<sup>2</sup>ИТЦ ОАО «Мосводоканал»

verigina.61@mail.ru

*Аннотация.* Дыхательная активность микроорганизмов – важный технологический показатель активного ила, позволяющий судить о биохимических возможностях активных илов, рассчитывать очистные сооружения, прогнозировать результаты использования тех или иных технологических операций. Проведено исследование дыхательной активности илов Курьяновских (КОС) и активных илов, формирующихся в биореакторах, работающих по различным технологиям биологической очистки.

*Ключевые слова:* скорость эндогенного дыхания, скорость дыхания гетеротрофов, скорость дыхания нитрификаторов