

# НОВАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Л.С. Новиков, В.Н. Милеев, А.А. Маклецов, В.В. Синолиц, Н.П. Чирская  
*Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ*  
E-mail: novikov@sinp.msu.ru

## Введение

В НИИЯФ МГУ разработаны физико-математические модели электризации космических аппаратов (КА), функционирующих на геостационарной и низких орбитах [1]. В настоящее время появились новые программные комплексы для математического моделирования физических процессов в реальных трехмерных объектах и методы решения сложных систем нелинейных уравнений большой размерности, которые позволяют провести модернизацию существующих моделей, значительно улучшить их функциональность и расширить область применимости. В настоящей работе рассмотрены основные особенности новой версии математической модели электризации КА и приведены примеры результатов расчетов.

## Новое программное обеспечение

Новая версия программного обеспечения (ПО) для исследования процессов электризации реальных КА сложной конфигурации базируется на открытой интегрируемой платформе SALOME [2], предназначенной для математического моделирования физических процессов в сложных гетерогенных объектах. Частью этой платформы является программа 3D-моделирования Open CASCADE [3], созданная на основе системы автоматического проектирования (САПР) CAD EUCLIDE компании Matra Datavision. Помимо этого в комплекс SALOME входят базовые модули описания задачи, построения расчетных сеток, пре- и постпроцессинга исходных данных и результатов вычислений, а также проблемно-ориентированные модули, создаваемые пользователями. С 2000 г. ПО под маркой SALOME распространяется фирмой Open Cascade S.A.S. на основе GNU LGPL лицензии, то есть с открытым исходным кодом и возможностью бесплатного использования в собственных коммерческих разработках.

Программная платформа SALOME построена на основе методов объектно-ориентированного программирования с использованием языка программирования C++, интерпретатора Python, современных графических интерфейсов: Qt, Vtk, OpenGL, языков и форматов описания структурированных данных XML, HDL, MED, средств обмена данными CORBA. Наиболее широко ПО SALOME используется под управлением операционной системы (ОС) Linux, в том числе на многопроцессорных параллельных суперкомпьютерах, однако существует версия SALOME и для ОС MS Windows.

Как уже отмечалось выше, ПО SALOME построено из отдельных функциональных модулей, имеющих общую иерархическую структуру

объектов и данных, и объединенных общим многооконным графическим интерфейсом. Рассмотрим основные стандартные модули ПО SALOME, используемые при решении задачи электризации КА сложной формы.

Геометрическая модель КА строится с помощью модуля GEOM из базисных одномерных, двумерных и трехмерных элементов (линия, диск, параллелепипед и т.п.). При этом возможно как выделение из объемной фигуры отдельных поверхностей с группировкой их по различным признакам и атрибутам (например, материалам покрытий), так и образование элементов более высокой размерности из элементов низшей размерности. Элементы могут копироваться, подвергаться преобразованиям переноса, вращения, отражения, а из двух или нескольких элементов с помощью логических операций (объединения, пересечения) можно получить новый элемент. Процесс построения фиксируется в программном файле на языке Python и интерактивно контролируется на дисплее в виде точечного, проволочного или объемного представления трехмерной модели.

На рис. 1 представлен вид окна графического интерфейса программного комплекса, в котором слева показана иерархическая структура, описывающая геометрические элементы, из которых строится модель. Геометрические параметры и характеристики конструкционных материалов отдельных элементов КА задаются в всплывающих окнах-меню. Создаваемая модель КА интерактивно отображается в трехмерном представлении в основном окне с возможностью движения модели и изменения масштаба.

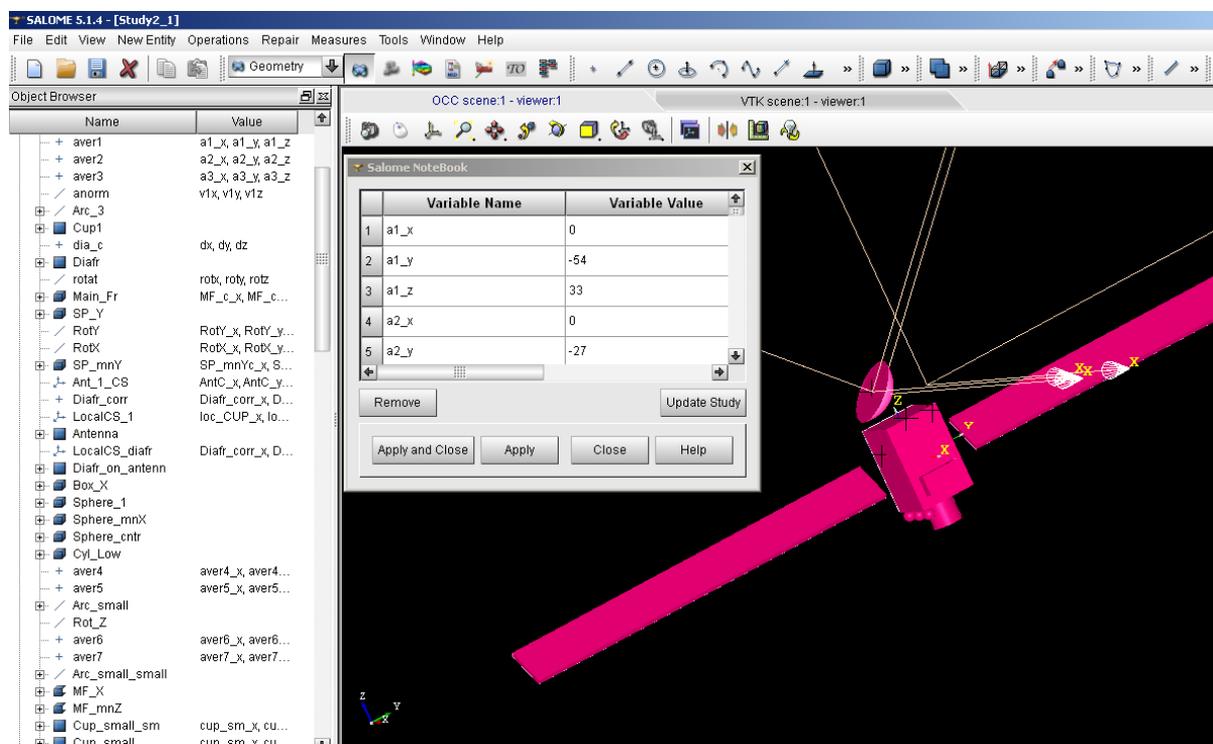


Рис. 1. Окно графического интерфейса с геометрической моделью КА и заданием параметров элемента

Для проведения расчетов на основе такой модели в модуле MESH создается дискретная расчетная сетка, состоящая из 1D, 2D и 3D элементарных

объектов. Для каждого геометрического элемента выбирается алгоритм разбиения линий и кривых, а также способ задания двумерных и трехмерных элементарных фигур: плоских треугольников или параллелограммов, пирамид или тетраэдров. Характерный размер сетки определяется с помощью так называемых «гипотез»: числа разбиений линий, линейного размера сетки, площади и объема элементарных фигур и т.п. Меняя алгоритмы и гипотезы можно адаптировать расчетную сетку в соответствии с особенностями конкретной вычислительной задачи (точность вычислений, число уравнений и т.д.) и имеющимися компьютерными ресурсами.

На рис 2. показан пример графического представления расчетной сетки на поверхности КА с всплывающими окнами редактирования описания и параметров сетки для отдельного элемента конструкции КА.

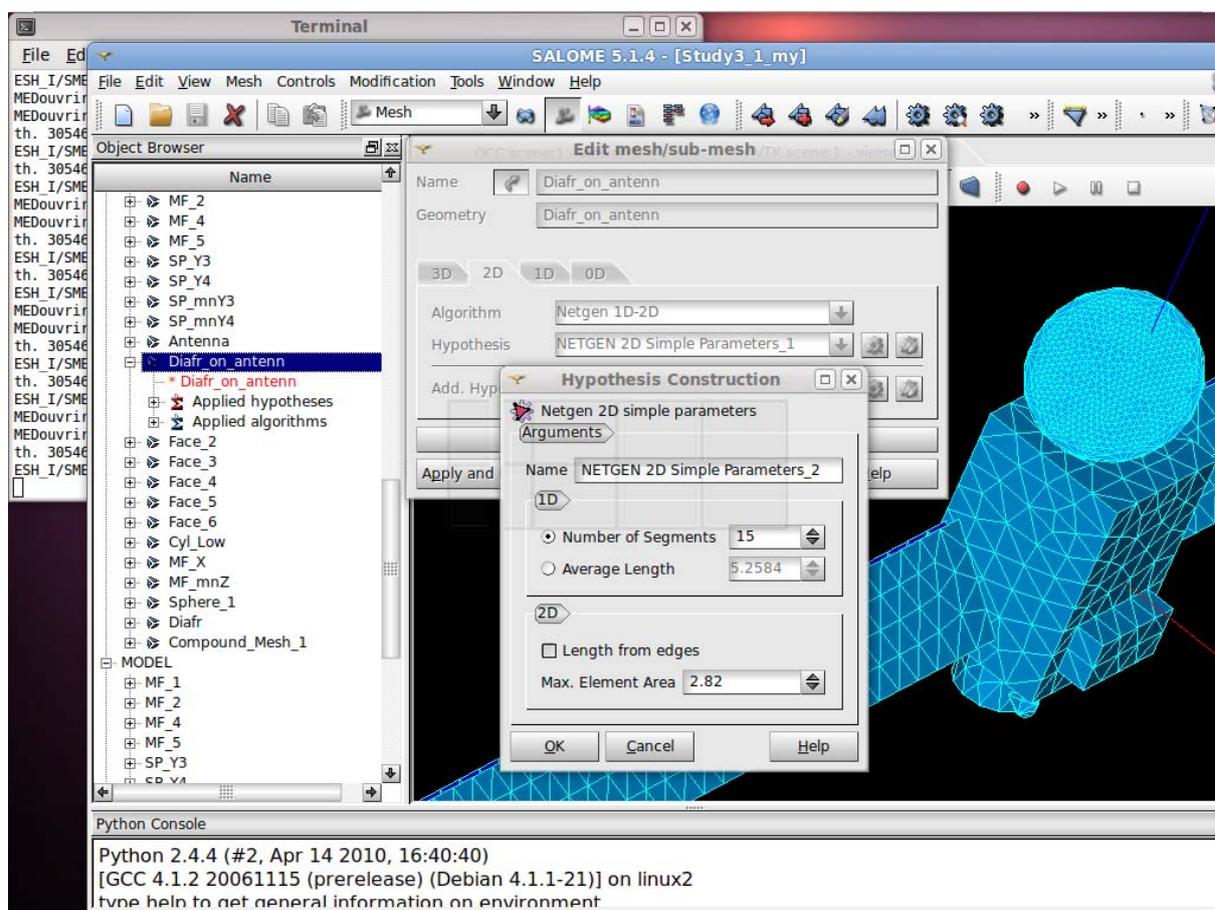


Рис. 2. Пример графического представления и описания расчетной сетки модели КА

Для построенной расчетной сетки определяется совокупность объектов, называемых «полями», содержащих входные и выходные данные решаемой задачи. Такими полями могут быть: геометрические характеристики модели (площадь, координаты центров тяжести, нормали элементов), физические параметры (коэффициенты вторичной эмиссии материалов, локальные токи на отдельных элементах сетки) и результаты расчетов электризации КА (потенциалы, напряженности поля, накопленный заряд). Все данные о сетке и полях запоминаются в виде структурированных объектов в так называемых

MED-файлах, которые могут быть использованы как в прикладных вычислительных модулях, так и в стандартном модуле POST-PRO, имеющем разнообразные возможности представления и визуализации данных: с помощью цветового кода, путем построения изолиний, векторных полей и т.п. Модуль POST-PRO позволяет также получать двумерные графики и отображать временное развитие процессов (анимацию) в интерактивном режиме или путем создания видеофайлов в формате AVI.

На рис. 3 показано представление результатов расчетов напряженности электрического поля на поверхности КА в виде цветового кода, а также отображение во всплывающем окне координат и численного значения напряженности поля в интерактивно выбранной точке. Аналогично может быть показано распределение потенциала на поверхности КА и в окружающем его пространстве.

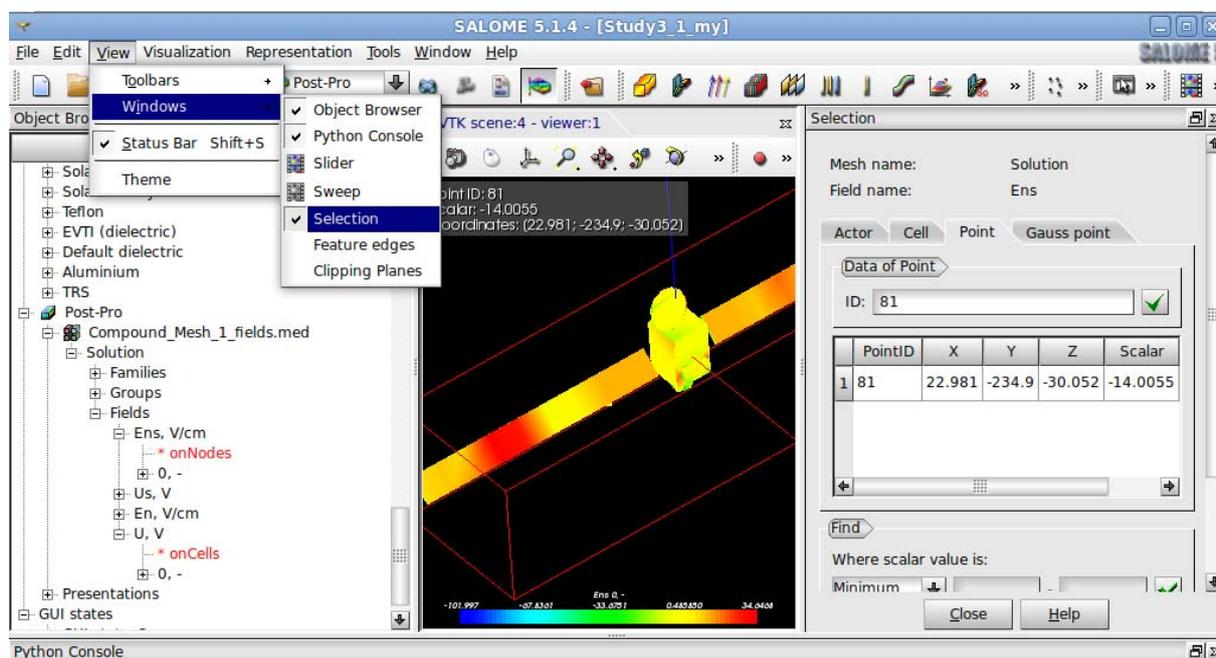


Рис. 3. Пример графического и численного представления величины напряженности электрического поля на поверхности КА

### Развитие методики расчетов электризации КА

Задача нахождения равновесного состояния при зарядении КА в космической плазме сводится к решению системы уравнений баланса токов для всех элементов расчетной сетки на поверхности КА с учетом зависимости токов от параметров плазмы, электрофизических характеристик материалов, величин потенциала  $U$  и напряженности электрического поля [1]  $E_n$ .

Эти зависимости в общем случае носят нелинейный характер и имеют различные пространственные и энергетические масштабы. При наличии открытых металлических элементов конструкции КА система уравнений баланса токов становится так называемой «жесткой», и для ее решения необходимо использовать специальные масштабируемые методы с контролем сходимости и точности вычислений [4].

Анализ составляющих полного тока показал, что при решении системы уравнений баланса токов удобно ввести безразмерные переменные:

$$\phi = \begin{cases} eU/T_e, & U < 0 \\ eU/T_{se}, & U > 0 \end{cases} \quad \text{и} \quad \varepsilon_n = \begin{cases} eE_n/RT_e, & E_n < 0 \\ eE_n/RT_{se}, & E_n > 0 \end{cases}$$

где  $e$  – заряд электрона,  $T_e \sim 1-20$  кэВ – средняя энергия электронной составляющей космической плазмы, а  $T_{se} \sim 5$  эВ – средняя энергия вторичных электронов,  $R$  – характерный размер КА. В результате такого преобразования производные тока по переменным  $\phi$  и  $\varepsilon_n$  становятся одного порядка как при отрицательных, так и положительных значениях этих переменных, в том время как при использовании переменных  $U$  и  $E_n$  соответствующие значения производных отличаются на величину  $T_e/T_{se} \sim 200 - 4000$ . Это значительно ускоряет сходимость и увеличивает точность расчетов при решении системы уравнений баланса токов.

Значительные упрощения решения электростатической задачи методом интегральных уравнений (граничных элементов) возникают при переходе от традиционного непрямого метода с промежуточными вычислениями плотности заряда к прямому методу с непосредственной связью между значениями потенциалов и напряженности электрического поля на поверхности КА [5]. В качестве граничных условий в рассматриваемой задаче задаются значения величин потенциала  $U$  на металлических поверхностях и напряженности электрического поля  $E_n$  на диэлектрических поверхностях. Неизвестными, определяемыми в результате решения электростатической задачи, являются значения потенциала на диэлектрических поверхностях и напряженности поля на металле. Сформулированная электростатическая задача удовлетворяет следующему интегральному уравнению:

$$\int_{S_c} \mathbf{A}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') E_n(\mathbf{r}') dS'_c - \int_{S_d} \mathbf{B}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') U(\mathbf{r}') dS'_d = F(\mathbf{r}),$$

где  $\mathbf{r}, \mathbf{r}'$  – радиус-векторы точек на поверхности КА и интегрирование ведется по металлическим  $S_c$  и диэлектрическим  $S_d$  поверхностям. Ядра  $\mathbf{A}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  и  $\mathbf{B}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  являются фундаментальными решениями уравнения Пуассона:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}; \quad \mathbf{B}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \mathbf{n}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2},$$

здесь  $\mathbf{n}'$  – вектор нормали к поверхности в точке  $\mathbf{r}'$ .

В левую часть уравнения собраны члены с неизвестными значениями потенциалов и напряженностей электрического поля. Функция  $F(\mathbf{r})$  выражается через известные значения потенциалов  $U_c^i (i = 1, 2, \dots, L)$  на  $L$  независимых (не соединенных электрически между собой) металлических поверхностях  $S_c^i$  и напряженности поля  $E_n$  на диэлектрических поверхностях следующим образом:

$$F(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^I U_c^i \int_{S_c^i} \mathbf{B}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')(\mathbf{r}') dS_c^i - \int_{S_d} \mathbf{A}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') E_n(\mathbf{r}') dS_d.$$

Численные алгоритмы решения такого интегрального уравнения методом граничных элементов в приложении к рассматриваемой задаче были разработаны ранее [1] и не требуют значительной переработки используемого ПО. Отметим, что использование прямой формулировки электростатической задачи вместо непрямого метода решения позволяет уменьшить время значительной части вычислений пропорционально числу элементов на поверхности, т.е. в реальных расчетах на 2-3 порядка.

## Заключение

Проведенные исследования и тестовые расчеты показали, что новая версия программного обеспечения для математического моделирования электризации КА, базирующаяся на вычислительной платформе SALOME открывает широкие возможности для построения усовершенствованных геометрических моделей КА, описания физических характеристик материалов поверхности КА, интерактивного представления исходных данных и результатов вычислений. Использование новых масштабируемых методов решения систем нелинейных уравнений большой размерности позволяет проводить расчеты процессов электризации реальных КА сложной конфигурации при различных условиях их функционирования. Разработанное программное обеспечение может служить основой для создания унифицированного программного комплекса для математического моделирования воздействия космической среды на КА.

1. Л.С. Новиков, В.Н. Милеев, А.А.Маклецов, К.К. Крупников, В.В. Синолиц, В.Г.Малько, А.П. Плохих, В.С. Саенко, А.П.Тютнев. Математическое моделирование электризации космических аппаратов. В кн. «Модель космоса», 8-е издание, т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Л.С. Новикова, М.: Изд-во «Книжный дом Университет», 2007, с. 276-314.
2. SALOME – The open source integration platform for numerical calculations. <http://www.salome-platform.org/>
3. Open CASCADE Technology, 3D modeling & numerical simulation. <http://www.opencascade.org/>
4. The Scalable Nonlinear Equations Solvers (SNES). In: PETSc Users Manual. ANL-95/11 - Revision 3.0.0. Argonne National Laboratory, 2008
5. К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. Метод граничных элементов. М.: Мир, 1987, 524 с.