



Об авторе

Никита Андреевич Рязанов — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград.
E-mail: ryazanov-92@mail.ru

About the author

Nikita Ryazanov — PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: ryazanov-92@mail.ru

УДК 519.6

29

Л. В. Зинин, А. А. Шарамет, А. Ю. Васильева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫМ МИКРОСПУТНИКОМ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Приводятся результаты моделирования взаимодействия одноионной тепловой ионосферной плазмы, состоящей из ионов кислорода и электронов с заряженным микроспутником. Для моделирования использовался метод молекулярной динамики. Показано, что за спутником возникает так называемая ионная тень с низкой ионной концентрацией.

The results of modeling the interaction of a single-ion thermal ionospheric plasma consisting of oxygen ions and electrons with a charged microsatellite are presented. The molecular dynamics modeling method was used. It is shown that behind the satellite there is a so-called ionic shadow with a low ionic concentration.

Ключевые слова: математическое моделирование, тепловая плазма, метод молекулярной динамики, заряженный спутник.

Key words: mathematical modeling, thermal plasma, molecular dynamics method, charged satellite

Хорошо известно, что на измерения макропараметров тепловой ионосферно-магнитосферной плазмы значительное влияние оказывает заряд космического аппарата. Этот факт существенно осложняет интерпретацию измерений, которая и так достаточно сложная экспериментальная задача. Исследованию этой проблемы посвящено достаточно большое число работ, отметим классическую — [1]. В последние годы делались различные попытки снижения потенциала спутника во время космического полета (см.: [2; 3]).

Вместе с тем имеющиеся в настоящее время активные способы снижения положительного потенциала спутника, например с помощью инъекции ионного пучка [2], отрицательно сказываются на измерениях другими приборами. Для анализа измерений были разработаны неко-



торые модели, часть которых успешно использовались для моделирования взаимодействия плазмы и заряженного спутника [4–6]. Отметим и работы по созданию моделей космических аппаратов и распределения электрических полей вокруг них [7–10].

Математические модели, посвященные расчетам физических характеристик плазмы вблизи космических аппаратов, были основаны главным образом на методе крупных частиц [7; 8]. Метод имеет несомненные преимущества при моделировании плазмы, концентрация которой составляет порядка сотен и тысяч частиц в кубическом сантиметре.

Между тем при более низких концентрациях возможно применение «прямого» метода моделирования – метода молекулярной динамики [11; 12]. Суть его состоит в моделировании движения всех частиц в области моделирования (электронов и ионов) в соответствии с законами классической механики, при этом электрическая сила в правой части уравнения движения складывается из электрического поля спутника и электрических полей всех частиц в области моделирования [13–15]. Такой подход имеет очевидные преимущества, но при этом требует значительных вычислительных мощностей и в настоящее время может быть использован как тестовый, не претендуя на детальное описание процессов взаимодействия заряженного спутника и плазмы. Более того, стремительный рост вычислительных возможностей суперкомпьютеров дает уверенность в том, что модельные задачи будут приближены к реальным в ближайшем будущем.

Уравнения модели, как уже указывалось, соответствуют уравнениям движения частицы в рамках классической механики

$$m\mathbf{a} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v} \times \mathbf{H}],$$

где m – масса частицы (электрона или иона); q , \mathbf{a} , \mathbf{v} – заряд, векторы ускорения и скорости частиц; \mathbf{E} – напряженность электрического поля; \mathbf{H} – магнитное поле. Напряженность электрического поля рассчитывается в соответствии с законом Кулона и является суммой значений от всех n частиц и микроспутника:

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \frac{\mathbf{r}_i}{r_i} + \mathbf{E}_{\text{sat}}.$$

Задача рассматривалась в следующей постановке. Модельная область представляла собой куб с ребром 1 метр. В центре этого куба расположен микроспутник диаметром 10 см. Относительная скорость спутника по отношению к плазме составляет 5 и 10 км в секунду и направлена вдоль горизонтальной оси X .

Тепловая плазма состоит из однозарядных ионов кислорода и электронов. Общее число частиц каждого типа в расчетной области $2 \cdot 10^7$. В начальный момент времени все частицы распределены равномерно внутри рабочей области, а их скорости подчиняются закону распределения Максвелла с температурой 5000 К. Заряд спутника составляет +5 Вольт, что типично для высот магнитосферы на освещенных участках.



Временной шаг составляет 10^{-8} с, что соответствует пространственному масштабу примерно 5 мм для электронов, чьи тепловые скорости порядка 500 км/с. Электроны, попавшие на поверхность спутника, поглощаются, а электрический потенциал микроспутника поддерживается инжектируемыми фотоэлектронами. Ионы кислорода и электроны, вылетевшие из расчетной области, возвращаются обратно с невозмущенными «максвелловскими» скоростями вследствие того, что на передней и боковых границах расчетной области должно поддерживаться условие квазинейтральности, соответствующее невозмущенным условиям.

На каждом шаге моделирования необходимо решать $4 \cdot 10^7$ уравнений, причем для каждого из них в правой части рассчитывать электрическое поле от всех частиц и спутника. Магнитное поле в данных расчетах не учитывается. Расчеты были сделаны на вычислительном кластере Балтийского федерального университета им. И. Канта.

Решать задачу на установление в классическом виде не представляется возможным в силу статистических флуктуаций. В силу этого в данной работе мы ограничились рассмотрением временного интервала 10^{-4} с порядка плазменной частоты.

На рисунке 1 представлены ионы кислорода (один ион — одна точка), пересекшие плоскость XOZ за два последних временных шага.

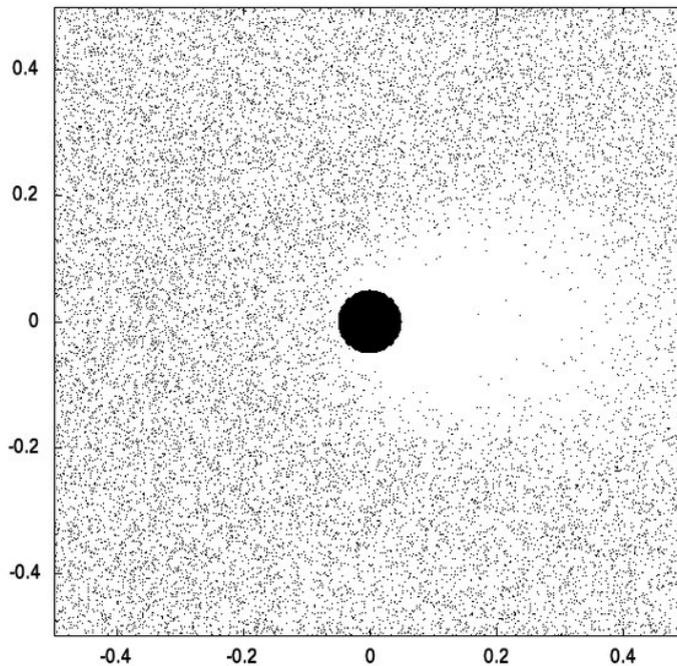


Рис. 1. Пространственное распределение ионов кислорода в плоскости XOZ .
Относительная скорость плазмы и спутника направлена вдоль горизонтальной оси и составляет 5 км/с



Значительное влияние электрического поля и относительной скорости плазмы на пространственное распределение ионов кислорода наблюдается только в области за спутником. Для скорости 5 км/с зоны сильно пониженной ионной концентрации перед спутником почти не наблюдается. Ионная тень имеет поперечные размеры порядка размера микроспутника и продольные размеры до 40 см.

Увеличение относительной скорости плазмы до 10 км/с приводит к удлинению ионной тени и более выраженному сгущению ионов перед спутником (рис. 2). Ионная тень простирается до границы области моделирования и имеет меньшую поперечную величину.

32

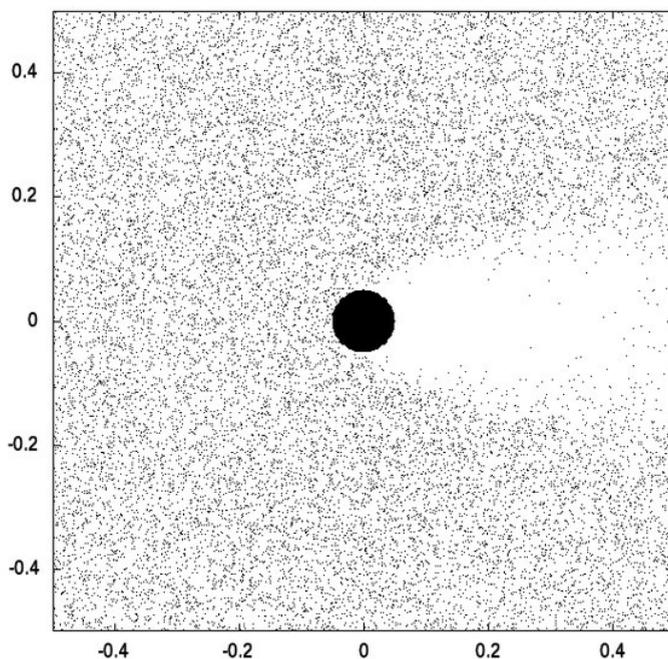


Рис. 2. Пространственное распределение ионов кислорода в плоскости XOZ .
Относительная скорость плазмы и спутника направлена
вдоль горизонтальной оси и составляет 10 км/с

Таким образом, моделирование взаимодействия положительно заряженного микроспутника и тепловой кислородной плазмы методом молекулярной динамики показало наличие ярко выраженной ионной тени за спутником. Ее геометрические характеристики зависят от макропараметров плазмы, потенциала спутника и относительной скорости плазмы и спутника.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 15-01-00369-а.

Список литературы

1. Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Пятаевский Л. П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М., 1964.



2. Ридлер В., Торкар К., Веселов М. В. и др. Эксперимент РОН по активному регулированию электростатического потенциала космического аппарата // Космические исследования. 1998. Т. 36, № 1. С. 53 – 62.

3. *Torkar K., Veselov M. V., Afonin V. V. et al.* An experiment to study and control the Langmuir sheath around INTERBALL-2 // *Ann. Geophys.* 1998. Vol. 16. P. 1086 – 1096.

4. *Hamelin M., Bouhram M., Dubouloz N. et al.* Combined effects of satellite and ion detector geometries and potentials on the measurements of thermal ions. The Hyperboloid instrument on Interball // *Proc. 7th Spacecraft Charging Technology Conference, 23–27 April 2001, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.* ESA SP-476. P. 569 – 574.

5. *Bouhram M., Dubouloz N., Hamelin M. et al.* Electrostatic interaction between Interball-2 and the ambient plasma. 1. Determination of the spacecraft potential from current calculations // *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. № 3. P. 365 – 376.

6. *Hamelin M., Bouhram M., Dubouloz N. et al.* Electrostatic interaction between Interball-2 and the ambient plasma. 2. Influence on the low energy ion measurements with Hyperboloid // *Ibid.* P. 377 – 390.

7. *Mandell M. J., Katz I., Hilton M. et al.* Nascap-2K spacecraft charging models: algorithms and applications // 2001: A spacecraft charging odyssey. Proceeding of the 7th Spacecraft Charging Technology Conference. 23–27 April 2001. ESTEC. Noordwijk. The Netherlands. ESA SP-476. P. 499 – 507.

8. *Hilgers, A., Clucas S., Thiébaud B. et al.* Modeling of Plasma Probe Interactions With a PIC Code Using an Unstructured Mesh // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2008. Vol. 36, № 5, Part 2. P. 2319 – 2323.

9. *Thiebault B., Jeanty-Ruard B., Souquet P. et al.* SPIS 5.1: An Innovative Approach for Spacecraft Plasma Modeling // *Ibid.* 2015. Vol. 43, № 9.

10. *Novikov L. S., Makletsov A. A., Sinolits V. V.* Comparison of Coulomb-2, NASCAP-2K, MUSCAT and SPIS codes for geosynchronous spacecraft charging // *Advances in Space Research.* 2015.

11. *Alder B. J., Wainwright T. E.* Transport processes in statistical mechanics. N. Y., 1958.

12. *Холмуродов Х. Т., Алтайский М. В., Пузынин М. В. и др.* Методы молекулярной динамики для моделирования физических и биологических процессов // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 2003. Т. 34, вып. 2. С. 474 – 515.

13. *Зинин Л. В., Ишанов С. А., Шарамет А. А., Мацеевский С. В.* Моделирование распределения ионов вблизи заряженного спутника методом молекулярной динамики. 2-D приближение // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта.* 2012. Вып. 10. С. 53 – 60.

14. *Шарамет А. А., Зинин Л. В., Ишанов С. А., Мацеевский С. В.* 2D моделирование ионной тени за заряженным спутником методом молекулярной динамики // *Там же.* 2013. Вып. 10. С. 26 – 30.

15. *Зинин Л. В., Шарамет А. А., Ишанов С. А., Мацеевский С. В.* Моделирование траекторий электронов и ионов тепловой плазмы в электрическом поле спутника методом молекулярной динамики // *Там же.* 2014. № 10. С. 47 – 52.

Об авторах

Леонид Викторович Зинин – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: leonid.zinin@gmail.com

Александр Александрович Шарамет – асс., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: alexsharamet@gmail.com



Алевтина Юрьевна Васильева — асс., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: vasilyeva.alevtina@gmail.com

About the authors

Prof. Leonid Zinin — I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: leonid.zinin@gmail.com

Alexandr Sharamet — ass., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: alexsharamet@gmail.com

Alevtina Vasileva — ass., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: vasilyeva.alevtina@gmail.com

34

УДК 512.62

С. И. Алешников, М. В. Алешникова, А. А. Горбачёв

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНЕЧНЫХ ПОЛЯХ

В работе предложены два алгоритма вычисления обратных элементов в конечном поле \mathbf{F}_{q^n} , где q — степень простого числа. Они получены путем обобщения алгоритма Вонга для поля \mathbf{F}_{2^n} с использованием главной идеи быстрого алгоритма вычисления обратного элемента в поле \mathbf{F}_{2^n} .

In work are two algorithms of calculation of inverses in a finite field \mathbf{F}_{q^n} developed, where q is power of the prime number. They are received by generalisation of algorithm of Wong for a field \mathbf{F}_{2^n} with use of the main idea for fast algorithm of calculation of inverses in the field \mathbf{F}_{2^n} .

Ключевые слова: конечное поле, умножение, инверсия, нормальный базис, циклический сдвиг, алгоритм, быстрый алгоритм.

Key words: finite field, multiplication, inversion, normal basis, cyclic shift, algorithm, fast algorithm.

Введение

В криптосистемах с открытым ключом на эллиптических и гиперэллиптических кривых, в криптосистемах на основе идентификационных данных, использующих спаривания Вейля и Тэйта и их модификации, используются конечные поля большого порядка. В то же время наиболее трудоемкая операция — вычисление обратных элементов. Вопросам ускорения вычислений посвящена огромная литература.