УДК 533.9

**Д. Н. ЛАЗУЧЕНКОВ, Н. М. ЛАЗУЧЕНКОВ**

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ПРОВОДЯЩЕГО ЦИЛИНДРА СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

*Институт технической механики*
*Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,*
*ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: vashuvalov@ukr.net*

Моделирование взаимодействия проводящего тела с потоком плазмы является важным этапом разработки научных и технологических диагностических приборов, элементов конструкций перспективных космических аппаратов и систем. Целью статьи является обоснование разработанного авторами алгоритма численного моделирования взаимодействия проводящего заряженного тела с потоком разреженной плазмы. Описаны ключевые элементы алгоритма решения двумерной системы уравнений Власова–Пуассона на примере задачи сверхзвукового поперечного обтекания проводящего цилиндра низкотемпературной неизотермической разреженной плазмой. В алгоритме реализована возможность решения уравнений Власова конечно-разностными методами расщепления или методом характеристик. При расчете локально равновесного самосогласованного электрического поля для электронной компоненты использованы модели Власова–Пуассона и Пуассона–Больцмана в приближении локально равновесных электронов и с учетом стока электронов на поверхности тела в приближении центрального поля. Сформулированы критерии применимости приближенных моделей Пуассона–Больцмана в окрестности обтекаемого тела. Достоверность получаемых результатов подтверждена как проведением тестовых расчетов известных модельных задач, так и сравнением результатов решения одинаковых физических задач с использованием разных математических моделей. Рассчитаны полные токи на поперечно обтекаемый заряженный цилиндр в зависимости от потенциала, ионного скоростного отношения и степени неизотермичности плазмы. Использование в алгоритме конечно-разностного метода расщепления для решения уравнений Власова и вложенных сеток открывает возможности развития алгоритма для учета столкновений в плазме и включения в расчетную схему источников и стоков заряженных частиц. Результаты могут быть использованы в диагностике низкотемпературной разреженной плазмы и проектировании элементов конструкции космических аппаратов и систем.

***Ключевые слова:*** *поток разреженной неизотермической плазмы, поперечное обтекание цилиндра, система уравнений Власова–Пуассона, метод расщепления, уравнение Пуассона–Больцмана, модельные распределения электронов, вложенные сетки, расчет тока на цилиндр.*

1. *Mott-Smith H., Langmuir I.* The theory of collectors in gaseous discharges. Phys. Rev. 1926. V. 28. № 5. P. 727–763.
2. *Hoegy W. R., Wharton L. E.,* Current to a moving cylindrical electrostatic probe. Journal of Applied Physics. 1973. V. 44, No. 12. P. 5365–5371.
3. *Чан П., Толбот Л., Турян К.* Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме. М.: Мир, 1978. 201 с.
4. *Godard R., Laframboise J.* Total current to cylindrical collectors in collision less plasma flow. Planetary Space Science. 1983. V. 31, № 3. P. 275–283.
5. *Xu G. Z.* The interaction of a moving spacecraft with the ionosphere: Current collection and wake structure : Ph.D. dissertation. York University, 1992. 258 p.
6. *Choiniere E.* Theory and experimental evaluation of a consistent steady-state kinetic model for two-dimensional conductive structures in ionospheric plasmas with application to bare electrodynamic tethers in space : Ph.D. dissertation. University of Michigan, 2004. 288 p.
7. *Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Питаевский Л. П.* Искусственные спутники в разреженной плазме. М.: Наука, 1964. 382 с.
8. *Лазученков Д. Н., Лазученков Н. М.* Моделирование взаимодействия потока разреженной плазмы с обтекаемым заряженным проводящим цилиндром вблизи проводящей поверхности. Техническая механика. 2014. №2. С. 63–72.
9. *Кошмаров Ю. А., Рыжов Ю. А.* Прикладная динамика разреженного газа. М.: Машиностроение, 1977. 184 с.
10. *Лазученков Д. Н.* Расчет отталкивающего электроны самосогласованного электрического поля вблизи обтекаемого потоком разреженной плазмы цилиндра. Техническая механика. 2012. №4. С. 27–35.
11 *Лазученков Д. Н., Лазученков Н. М.* Интерпретация зондовых измерений в потоке бесстолкновительной плазмы. Техническая механика. 2018. № 1. С. 107–120.
12. *Титарев В. А., Шахов Е. М.* Численный расчет поперечного обтекания холодной пластины гиперзвуковым потоком разреженного газа. Механика жидкости и газа. 2005. № 5. С. 140–154.
13. *Latramboise J. G.* Theory of Spherical and Cylindrical Langmuir Probes in a Collisionless Maxwellian Plasma at Rest. Report, No. 100. Univ. of Toronto, Institute of Aerospace Studies. 1966. 210 c.

14. *Самарский А. А., Николаев Е. С.* Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 592 с.
15. *Сигов Ю. С.* Численные методы кинетической теории плазмы. М.: Изд-во. МФТИ, 1984. 94 с.
16. *Бэдсел Ч., Ленгдон А.* Физика плазмы и численное моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1989. 452 с.
17. *Кайл Р. Е., Гей Ф. С., Густафсон В. А.* Электрические потенциальные поля ионосферного спутника. РТК. 1968. №4. С. 139–145.
18. *Алексеев Б. В., Котельников В. А.* Зондовый метод диагностики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 240 с.

Получено 12.02.2019,
в окончательном варианте 04.03.2019