

# Физика плазмы и плазменные методы

УДК 533.9:004.94

## Кинетическая модель плазмы в газоразрядной камере ионного двигателя

Д. А. Кравченко

*В работе описывается двухмерная по координатам и трехмерная по скорости нестационарная кинетическая модель плазмы в газоразрядной камере ионного двигателя, решаемая методом частица-в-ячейке (2D3V-FullPIC). Данная модель предназначена для исследования особенностей горения разряда в зависимости от различных режимов работы, геометрии разрядной камеры и топологии магнитного поля. Приводятся результаты моделирования и выполняются их сравнение с результатами эксперимента.*

PACS: 52.75.Di; 52.65.Cc; 52.65.Pp; 52.65.Rr.

*Ключевые слова:* электроракетные двигатели, ионные двигатели, плазма, численное моделирование, кинетическое моделирование, частица в ячейке.

### Введение

Ионные двигатели (ИД) активно разрабатываются и используются в составе космических аппаратов со второй половины двадцатого века [1]. Принцип работы ИД заключается в ионизации и последующем ускорении атомов рабочего тела. Ионные двигатели с разрядом постоянного тока состоят из газоразрядной камеры (ГРК), ионно-оптической системы и катода компенсатора. В разряде ГРК между катодом и анодами создается плазма, ионы которой вытягиваются перфорированным эмиссионным электродом. Поле, создаваемое магнитами постоянного тока, используется для удержания электронов в камере и повышения эффективности ионизации газа. Напряжение, приложенное между эмиссионным и ускоряющим электродами на выходе из ГРК, ускоряет ионы до высоких скоростей, обеспечивая создание тяги. Положительный заряд ионного пучка на выходе из двигателя компенсируется катодом-компенсатором, эмитирующим электроны.

В настоящее время в Центре Келдыша ведется активная разработка ИД различной мощности. Особое внимание уделяется разработке и ис-

пытаниям двигателя ИД-500 с мощностью 35 кВт и двигателя ИД-200 с мощностью 5 кВт. ИД-500 предназначен в качестве маршевого двигателя для тяжелых энерговооруженных платформ. ИД-200 планируется использовать как двигатель коррекции. Подробно текущее состояние разработки этих машин описано в работе [2].

Численное моделирование плазмы в ГРК ИД является важным инструментом для отработки и усовершенствования существующих и создания новых перспективных ионных двигателей. Прежде всего, модель ГРК, дополненная моделью ионно-оптической системы, позволяет прогнозировать ресурс конструкции двигателя. Учитывая то, что требуемый ресурс ионных двигателей составляет десятки тысяч часов, выполнение прямых ресурсных испытаний является чрезвычайно дорогим и длительным делом. Вторым важным аспектом, обосновывающим необходимость разработки комплекса моделирующих программ, является то, что моделирование позволяет еще на этапе разработки предсказать эффективность и ресурс нового двигателя либо усовершенствования существующего. И, наконец, моделирование критически важно для исследования физики процессов, протекающих в плазме, поскольку позволяет получить такие параметры, непосредственное измерение которых в эксперименте либо очень трудоемко, либо вовсе невозможно. Таким образом, численное моделирование, дополняющее экспериментальные исследования и опирающееся на их результаты, необходимо для прогресса в разработке ИД в частности и электроракетных двигателей в целом.

---

Кравченко Дмитрий Александрович, научный сотрудник.  
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».  
Россия, 125438, Москва, ул. Онежская, д. 8.  
Тел. 8 (909) 154-67-39.  
E-mail: dmitry1204@gmail.com

Статья поступила в редакцию 27 августа 2015 г.

© Кравченко Д. А., 2015

Применение численного моделирования к исследованию процессов, протекающих в ГРК ИД, имеет солидную историю, а именно, первые работы, посвященные этой тематике, датированы ещё 1980-ми годами. Эти работы либо рассматривали ГРК в 0-м приближении, либо были посвящены исследованию какого-либо отдельного процесса. К примеру, в работе [3] описывается простая аналитическая модель. В ней распределения частиц и скоростей образования ионов полагаются равномерными во всем объеме газоразрядной камеры. Несмотря на такие грубые упрощения, модель показала удовлетворительное соответствие эксперименту. В дальнейшем она была переработана и усовершенствована [4].

Одним из важных шагов на пути к комплексному моделированию ГРК была работа [5], в которой рассматривались траектории движения первичных электронов. Модель, названная PRIMA, рассчитывала траектории этих частиц в стационарном поле с учетом столкновений с фоном нейтральных атомов. Столкновения моделировались методом Монте-Карло. После того, как в модели были учтены аномальные столкновения, авторам удалось добиться хорошего соответствия результатов моделирования экспериментальным данным. Модель была усовершенствована другой командой авторов [6], после чего стала представлять собой очень хороший инструмент для исследования поведения первичных электронов в различных конфигурациях ГРК.

Первая численная модель, описывающая плазму в ГРК, была описана в [7]. В ней рассмотренное в моделях [5, 6] движение первичных электронов было дополнено моделированием диффузии ионов и холодных вторичных электронов. Также учитывались результаты работы [3]. Было получено качественное соответствие результатам эксперимента для величин энергетической цены иона и эффективности использования рабочего тела. В работе [8] была описана гибридная 2D/3D модель, близкая к модели [7]. В данной работе первичные электроны моделировались кинетически, остальные компоненты плазмы — гидродинамически. Однако эта модель учитывала большее число явлений. Во всех гибридных моделях применялось приближение квазинейтральности, хорошо описывающее плазму внутри ГРК, но неприменимое к пристеночным областям и окрестностям магнитных полюсов.

Полностью кинетическая двухмерная модель описана в работе [9]. В ней моделируются движения пяти типов частиц: первичных электронов, холодных вторичных электронов, одно- и двухзарядных ионов и нейтралов. Распределение электрического поля в области моделирования находилось как суперпозиция двух компонент, а

именно, статического поля, определяемого граничными условиями, и динамического поля, определяемого распределением частиц. Все пристеночные слои плазмы моделировались косвенно. Плазма в прикатодной области не моделировалась, ее параметры задавались исходя из результатов эксперимента. Столкновения между частицами моделировались методом Монте-Карло. Результаты моделирования хорошо соответствуют результатам эксперимента. Данная модель тщательно совершенствовалась авторами на протяжении нескольких лет и в настоящее время является наиболее полной и известной кинетической моделью плазмы в ГРК ИД.

Кинетическое моделирование позволяет детально исследовать физику процессов, протекающих в плазме ГРК ИД. Однако существует ряд трудностей, с которыми такие модели неизбежно сталкиваются. Прежде всего, кинетическое моделирование требует больших вычислительных ресурсов, поскольку, с одной стороны, модель должна разрешать высокие частоты плазменных колебаний, с другой — необходимо смоделировать длительный процесс установления стационарного состояния разряда в большой области моделирования. Кроме этого, остаются открытыми вопросы, связанные с моделированием некоторых «проблемных» областей: прикатодной области, магнитных каспов, поверхности эмиссионного электрода.

Целью данной работы является представление двухмерной и полностью кинетической модели плазмы в ГРК ИД, разработка которой в настоящее время ведется в Центре Келдыша. Эта модель близка к модели, описанной в работе [9], однако имеет ряд существенных отличий. Во-первых, модель не требует использования результатов экспериментов для описания прикатодной области, т. к. вместо этого моделируется процесс эмиссии первичных электронов. Во-вторых, модель напрямую разрешает пристеночные слои в плазме без введения дополнительных допущений. В-третьих, из электронной компоненты плазмы не выделяется группа первичных электронов. Вместо этого реализован механизм выбора индивидуального шага по времени для каждой частицы в зависимости от ее энергии и положения. Это позволяет получить существенное ускорение расчета без внесения дополнительных неточностей.

### Описание модели

В модели рассматриваются следующие процессы: самосогласованное движение частиц в электромагнитном поле, их эмиссия и столкновения с границами области моделирования, взаимодействия между частицами внутри области моделирования.

Областью моделирования является внутренний объем газоразрядной камеры в осесимметричном представлении. Двухмерное по координате моделирование осуществляется в плоскости  $R-Z$ . Область моделирования ограничена элементами конструкции ГРК: анодами, катодом, эмиссионным электродом, элементами корпуса и осью симметрии. На рис. 1 показана схема области моделирования.

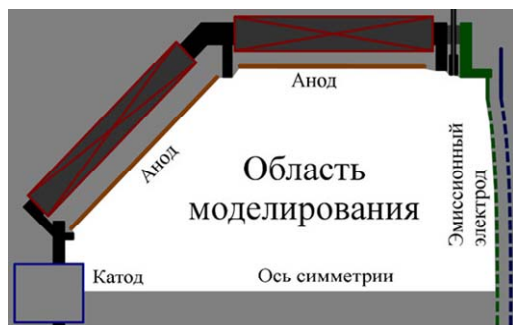


Рис. 1. Схема области моделирования

В модели применен классический подход для описания компонент плазмы в кинетическом приближении [10, 11]. Частица как объект, которым оперирует модель, олицетворяет большую совокупность реальных электронов, ионов или нейтралов, локализованных в окрестностях некоторой точки в пространстве и имеющих близкие по величине и направлению скорости.

Все параметры плазмы, такие как концентрации частиц, потенциал плазмы, величины напряженности электрических и магнитных полей и другие, определяются в узлах сетки. В данной модели выбрана однородная прямоугольная сетка с одинаковым пространственным шагом по обеим координатным осям. Для определения величин концентрации всех компонент в узлах сетки применяется метод билинейной интерполяции [10, 11].

Распределение магнитного поля в области моделирования определяется заранее с помощью отдельного приложения и полагается статическим. Распределение потенциала электрического поля определяется на каждом шаге по времени решением уравнения Пуассона с граничными условиями в виде потенциалов границ области моделирования. Для решения уравнения Пуассона применяется метод последовательной точечной верхней релаксации с ускорением по Чебышеву с нечетно-четным обходом узлов [11].

Интегрирование малых перемещений частиц на каждом шаге по времени под действием электромагнитных сил осуществляется по схеме Бóриса [12] с учетом осесимметричной геометрии области моделирования. Влиянием магнитного поля на движение ионов пренебрегается, поскольку для таких тяжелых частиц радиус Лармора на

порядки превышает характерные размеры области моделирования.

Взаимодействия между частицами моделируются с помощью метода Монте-Карло. В настоящий момент в модели рассматриваются следующие типы взаимодействий между частицами: упругие столкновения электронов с нейтралами, неупругие столкновения возбуждения электронов с нейтралами и ионизационные столкновения. Также с помощью упругих столкновений моделируется бомовская диффузия электронов.

Столкновения частиц с границами моделируются следующим образом. Электроны поглощаются при столкновениях с анодами и элементами магнитной системы, причем столкновение с катодом приводит к зеркальному отражению, столкновение с ионной оптикой — к диффузному отражению. Ионы при столкновениях с любой границей рекомбинируют, при столкновениях с ионно-оптической системой по коэффициенту прозрачности определяется вероятность покинуть область моделирования без рекомбинации. Нейтральные частицы диффузно отражаются от любой границы. Также коэффициент прозрачности определяет вероятность прохождения нейтрала сквозь ионную оптику без отражения.

При моделировании ГРК особую важность имеет методика моделирования катодной границы. В данной модели на катодной границе искусственно поддерживалась квазинейтральность путем добавления недостающих электронов с тепловым распределением около 5 эВ. Для этого выделялся перечень узлов, в которых реализовалась эта процедура. В этот перечень заносились все узлы, лежащие на расстоянии меньше четверти длины катодной границы от самой границы. На каждой итерации в окрестность каждого из этих узлов добавлялись новые электроны в том случае, если сам узел и четыре соседних с ним узла испытывали недостаток электронов. Таким образом, ток разряда при моделировании не задавался, а устанавливался в соответствии с процессами, протекающими внутри области моделирования.

### Выбор параметров моделирования

Для осуществления кинетического моделирования плазмы методом частица-в-ячейке необходимо правильно выбирать параметры моделирования. Нарушение основных соотношений между ключевыми параметрами модели и моделируемой плазмы приводит либо к полному развалу решения, либо к возникновению нефизических эффектов, например, таких как численный разогрев электронов и возникновение сильных осцилляций плотностей компонент плазмы и потенциала электрического поля.

Параметры моделирования должны позволять разрешать пространственные и временные масштабы моделируемой плазмы [10, 11]. Однако поскольку дебаевский радиус плазмы внутри ГРК много меньше размеров системы, а плазменная частота много выше требуемого для установления стационарного решения времени моделирования, то целесообразно использовать прием, основанный на введении коэффициента  $\tau^2$  в уравнение Пуассона [13]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = - \frac{\rho}{\tau^2 \varepsilon_0}.$$

Здесь  $\varphi$  — потенциал плазмы,  $\rho$  — плотность заряда,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $r$  и  $z$  — пространственные координаты. Данная операция, применяемая во многих работах, посвященных моделированию, приводит к увеличению дебаевского радиуса  $R_D$  и снижению плазменной частоты  $\omega_{pl}$ :

$$R_D = \tau \sqrt{\frac{kT_{pl}\varepsilon_0}{e^2 n_{pl}}},$$

$$\omega_{pl} = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{e^2 n_{pl}}{m_e \varepsilon_0}},$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $m_e$  и  $e$  — масса и заряд электрона,  $n_{pl}$  и  $T_{pl}$  — концентрация и температура плазмы.

Ширина ячейки пространственной сетки  $H$  связана с дебаевским радиусом следующим соотношением [11]:

$$H \leq \pi R_D.$$

Это условие позволяет определить величину коэффициента  $\tau$  при выбранной величине  $H$  и ожидаемых величинах плотности плазмы и энергии электронов:

$$\tau \geq \frac{H}{\pi} \sqrt{\frac{e^2 n_{pl}}{kT_{pl}\varepsilon_0}}.$$

Выбор длительности шага по времени  $\Delta t$  осуществляется аналогичным образом. Частота итераций должна позволять корректно разрешать плазменные колебания и циклотронное движение электронов в магнитном поле. Поскольку плазменная частота в плазме ГРК существенно выше, то именно она и является определяющей. Таким образом, имеем соотношение:

$$\Delta t \leq \omega_{pl}^{-1} = H / \left( \pi \sqrt{\frac{kT_{pl}}{m_e}} \right).$$

Величина в знаменателе является скоростью, которой в равновесной плазме обладает лишь малая часть электронов. Следовательно, можно считать, что условие разрешимости плазменной частоты эквивалентно выбору такого шага по времени, при котором наиболее быстрые электроны за одну итерацию будут перемещаться не более чем на ширину ячейки пространственной сетки.

Однако нужно принимать во внимание, что ожидаемые величины плотности и температуры плазмы должны быть оценены сверху, по возможности с некоторым запасом, поскольку предсказать поведение моделируемой системы на начальном этапе расчета сложно.

Количество реальных электронов либо ионов  $S$ , представляемых одной частицей при моделировании, определяется таким, чтобы добиться достаточной заполненности частицами ячеек пространственной сетки. Поскольку данная модель является осесимметричной, а при постоянной ширине пространственной сетки объем ячейки пропорционален расстоянию от нее до оси симметрии, именно условие для осевых ячеек является определяющим:

$$S \leq \frac{1}{10} n_{pl} \frac{\pi H^3}{4}.$$

Другими словами, размер частицы выбирается таким, чтобы при ожидаемой плотности плазмы в осевой ячейке в среднем находилось около десяти частиц.

### Методика ускорения расчета

Одна из основных трудностей, возникающих при кинетическом моделировании плазмы, заключается в длительном времени расчета. Для корректного описания движения электронов требуется задавать маленький шаг по времени. При этом время стабилизации решения, определяемое динамикой медленных нейтральных атомов, сравнительно велико. Таким образом, задача повышения быстродействия моделирующей программы весьма актуальна.

Одна из широко распространенных методик такого ускорения, применяемая во многих работах [9, 13], заключается в задании различного шага по времени для разных типов частиц. Это позволяет существенно экономить вычислительные ресурсы. В подавляющем большинстве кинетических моделей шаг по времени для тяжелых частиц (ионов и

нейтралов) задается отдельно. Это позволяет свести к минимуму затраты вычислительного времени на расчет перемещения тяжелых частиц, поскольку одна итерация ионного сдвига приходится на десятки или даже сотни электронных итераций.

Авторами работы [9] применен подход, основанный на разделении электронов на две группы: первичные и вторичные. Вторичные (медленные) электроны рационально моделировать с меньшим шагом по времени, что позволяет ускорить расчет.

В настоящей работе была предпринята успешная попытка развить этот метод, увеличив его продуктивность. Суть метода ускорения заключается в индивидуальном подборе длительности итерации для каждой частицы. Для электронов, расчет перемещения которых потребляет большую часть вычислительных ресурсов, метод реализуется следующим образом.

При очередном перемещении каждой частицы по ее скорости и положению определяется собственная длительность итерации: чем больше скорость частицы, тем меньше это время. Собственная длительность итерации  $t_e$  выбирается так, чтобы для частицы выполнялось наиболее сильное из условий разрешения перемещения частицы на пространственной сетке и вращения частицы в магнитном поле:

$$t_e = \min\left(\frac{1}{2} \frac{H}{v_e}, \frac{1}{2} \frac{m_e}{eB}\right).$$

Здесь  $v_e$  — скорость частицы,  $B$  — модуль вектора магнитной индукции в точке, в которой расположена частица. По соотношению индивидуального и базового шага по времени определяется номер итерации, на которой будет совершено следующее перемещение частицы.

Для правильного интегрирования уравнения движения при таком подходе возникает необходимость сохранять значения компонент электрического поля в узлах сетки. При расчете перемещения каждой частицы осуществляется расчет среднего электрического поля за все итерации, которые были этой частицей пропущены.

Распределение электронов по скоростям в ГРК ИД таково, что лишь малая доля частиц имеет относительно высокие скорости. Расчет их перемещений осуществляется часто и с хорошей точностью. При этом перемещения огромного количества медленных частиц рассчитывается раз в десятки итераций. При правильном подборе параметров моделирования это позволяет ускорить расчет более чем в три раза. Аналогичный подход применяется и к перемещению тяжелых частиц.

## Результаты моделирования

Для моделирования была выбрана газоразрядная камера двигателя ИД-200К, который разрабатывается в Центре Келдыша. Данный двигатель рассчитан на номинальную мощность 5 кВт, имеет тягу около 100 мН и удельный импульс тяги 65000 м/с [2].

Параметры газоразрядной камеры в процессе моделирования задавались следующими: потенциал анода — 30 В, расход ксенона в газораспределитель — 1,2 мг/с, расход ксенона в катод — 0,2 мг/с. Коэффициенты прозрачности ионной оптики для ионов и нейтралов рассчитывались с помощью разработанного в Центре Келдыша приложения IOS3D [14]. Эти коэффициенты зависят от геометрии отверстий в электродах ионно-оптической системы. Для нейтрального газа коэффициент прозрачности составил 0,15. Для ионов он определялся зависимостью от локальной плотности тока.

В процессе моделирования были получены распределения основных параметров плазмы внутри газоразрядной камеры: потенциала электрического поля, плотности плазмы, энергии электронов и концентрации нейтрального ксенона. Эти распределения представлены на рис. 2. На этом рисунке для наглядности распределения параметров, полученные в расчетной области (см. рис. 1), дополнены зеркальным отражением ниже оси симметрии.

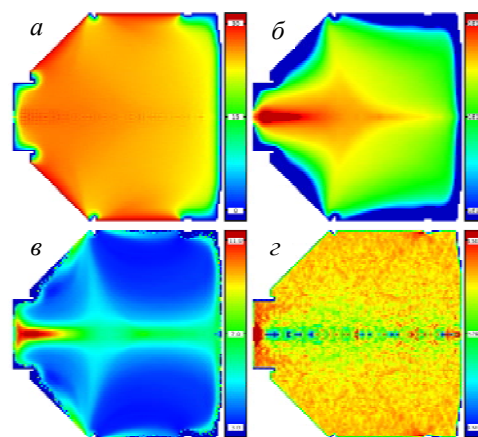


Рис. 2. Распределение параметров в области моделирования: а — потенциал плазмы, б — плотность плазмы, в — энергия электронов, г — плотность нейтрального газа

Также было осуществлено сравнение результатов моделирования с результатами экспериментов, проведенных ранее в Центре Келдыша [2]. В этих экспериментах с помощью зондов Фарадея, установленных перед ионно-оптической системой в струе двигателя, измерялось распределение плотности тока вдоль радиальной оси. На рис. 3 показано сравнение результатов моделирования с результатами эксперимента.

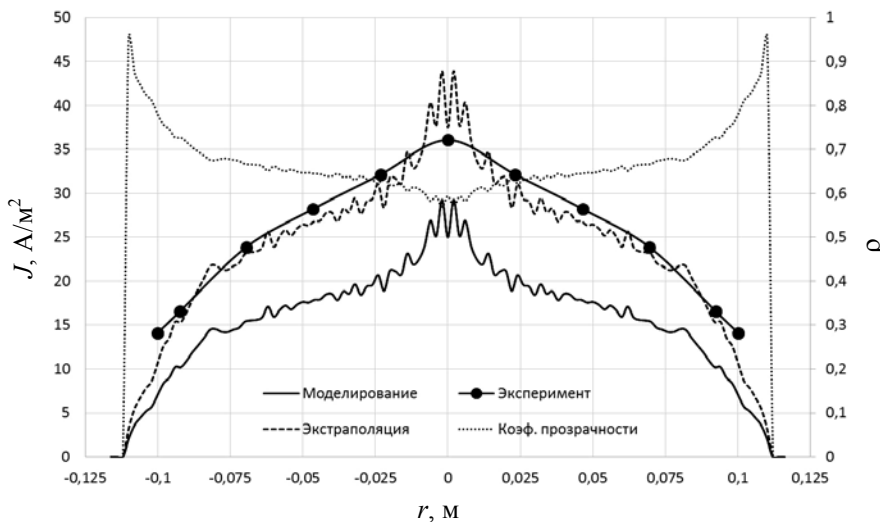


Рис. 3. Сравнение распределения плотности тока с результатами эксперимента

Из рисунка видно, что плотность ионного тока  $J_i$ , полученная в результате моделирования, занижена на ~30 % по сравнению с экспериментальными данными. В то же время формы распределения довольно близки. Анализ этого расхождения позволил предположить, что его причина заключается в том, что на данном этапе модель не учитывает ион-нейтральные столкновения перезарядки и столкновения между нейтралами. Это приводит к тому, что большая масса холодного нейтрального газа продолжает накапливаться в области катода. Электроны катодной плазмы в этом месте еще не имеют достаточной энергии для ионизации, а структура потенциала плазмы увлекает в эту область все больше ионов ксенона, которые рекомбинируют, накапливаясь там в виде нейтрального газа. В реальности же реализуется механизм сильного разогрева нейтрального газа на ион-нейтральных столкновениях перезарядки. Получившие высокую скорость нейтралы быстро покидают эту область, распределяясь по всему объему ГРК и ионизуясь там. Учет этого механизма при усовершенствовании модели, вероятно, позволит преодолеть это разногласие результатов моделирования с экспериментом.

Описанный выше механизм нефизичного накопления нейтрального газа возле катода приводит к тому, что при моделировании наблюдается разница между суммарным потоком ксенона в ГРК и суммарным потоком наружу. Для экстраполяции результатов моделирования необходимо увеличить плотность ионного тока в пропорции входящего потока ксенона к исходящему. На рис. 3 пунктирной кривой показано распределение плотности тока после такой экстраполяции. Видно, что эта кривая хорошо согласуется с экспериментом.

### Заключение

Данная кинетическая модель, разрабатываемая как инструмент исследования физики процессов

в плазме газоразрядной камеры ионного двигателя, имеет ряд отличий от подобных существующих моделей. Приведенные результаты моделирования и их сравнение с результатами эксперимента показывают, что на настоящем этапе разработки модель удовлетворительно описывает поведение плазмы в газоразрядной камере ионного двигателя. Однако сравнение с экспериментом показало некоторое расхождение данных и позволило выявить недостаток модели, который заключается в отсутствии учета ион-нейтральных столкновений перезарядки. Результаты моделирования должны быть сравнены с экспериментами для различных двигателей и их режимов работы. Усовершенствование модели и более тщательная ее верификация запланированы на будущее.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации № НШ-2784.2014.8.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Goebel D. M., Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. — Wiley, 2008.
2. Lovtsov A., Shagayda A., Muravlev V., et al. / 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, Hyogo-Kobe, Japan, 2015, IEPC-2015-291.
3. Brophy, J. R., Wilbur, P. J. // AIAA Journal. 2015. V. 23. No. 11. P. 1731.
4. Goebel D. M., Wirz R. E., Katz I. // Journal of Propulsion and Power. 2007. V. 23. No. 5. P. 1055.
5. Arakawa Y., Yamada T. / 21st International Electric Propulsion Conference, Orlando, Florida, 1990, AIAA 1990-2654.
6. Mahalingam S., Menart J. A. / 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, Indiana. 2002. P. 1—17, AIAA 2002-4262.
7. Arakawa Y., Ishihara K. / 22nd International Electric Propulsion Conference, Viareggio, Italy. 1991. P. 1—6, IEPC 1991-118.

8. Wirz R. E., Katz I. / 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Huntsville, Alabama. 2003. P. 1—10, AIAA 2003-5163.
9. Mahalingam S., Menart J. A. / 42th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, California. 2006. AIAA 2006-4488.
10. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics, via Computer Simulation. — McGraw-Hill Book Company, 1985.
11. Hockney R. W., Eastwood J. W. Computer Simulation Using Particles. — McGraw-Hill Book Company, 1987.
12. Boris J. P. / Proceeding of the 4<sup>th</sup> Conference on Numerical Simulation of Plasmas. Naval Res. Lab., Washington, D.C. P. 3—67.
13. Szabo J. J., Martinez-Sanchez M., Batishchev O. / AIAA 2000-3653, 36th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, July 2000.
14. Shagayda A. A. / Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, Hyogo-Kobe, Japan July 4—10, 2015, IEPC-2015-188/ISTS-2015-b-188.

## Kinetic model of plasma in an ion thruster discharge chamber

D. A. Kravchenko

Keldysh Research Centre  
8 Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russia  
E-mail: dmitry1204@gmail.com

*Received August 27, 2015*

***The paper presents the two-dimensional in space and three-dimensional in velocity non-stationary kinetic model of plasma in an ion thruster discharge chamber. The model is designed for research of discharge details that depend on thruster operation mode, discharge chamber geometry and magnetic field topology. Simulation results and its comparisons with experimental measurements are given.***

PACS: 52.75.Di; 52.65.Cc; 52.65.Pp; 52.65.Rr.

***Keywords:*** electric propulsion, ion thruster, plasma, numerical simulation, kinetic simulation, particle-in-cell.

### REFERENCES

1. D. M. Goebel and I. Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*. (Wiley, 2008).
2. A. Lovtsov, A. Shagayda, V. Muravlev, et al. in *Proc. 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium*, (Hyogo-Kobe, Japan, 2015).
3. J. R. Brophy and P. J. Wilbur, *AIAA Journal* **23**, 1731 (2015).
4. D. M. Goebel, R. E. Wirz, and I. Katz, / *Journal of Propulsion and Power* **23**, 1055 (2007).
5. Y. Arakawa and T. Yamada, in *Proc. 21st International Electric Propulsion Conference* (Orlando, Florida, 1990), AIAA 1990-2654.
6. S. Mahalingam and J. A. Menart, in *Proc. 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* (Indianapolis, Indiana. 2002). P. 1—17, AIAA 2002-4262.
7. Y. Arakawa and K. Ishihara, in *Proc. 22nd International Electric Propulsion Conference* (Viareggio, Italy. 1991). P. 1—6, IEPC1991-118.
8. R. E. Wirz and I. Katz, in *Proc. 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* (Huntsville, Alabama. 2003). P. 1—10, AIAA 2003-5163.
9. S. Mahalingam and J. A. Menart, in *Proc. 42th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, (Sacramento, California. 2006). AIAA 2006-4488.
10. C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics, via Computer Simulation*. (McGraw-Hill Book Company, 1985).
11. R. W. Hockney and J. W. Eastwood, *Computer Simulation Using Particles*. (McGraw-Hill Book Company, 1987).
12. J. P. Boris, in *Proceeding of the 4<sup>th</sup> Conference on Numerical Simulation of Plasmas*. (Naval Res. Lab., Washington, D.C.). P. 3—67.
13. J. J. Szabo, M. Martinez-Sanchez, and O. Batishchev, in *Proc. AIAA 2000-3653, 36th Joint Propulsion Conference and Exhibit* (Huntsville, July 2000).
14. A. A. Shagayda, in *Proc. Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium* (Hyogo-Kobe, Japan July 4—10, 2015). IEPC-2015-188/ISTS-2015-b-188.