

УДК 533.9

О МЕТОДИКЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ В ЗАДАЧЕ ЭКСТРАКЦИИ ИОНОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАЗДЕЛЕНИИ ИЗОТОПОВ

С. А. Майоров

Рассмотрены подходы к моделированию бесстолкновительной плазмы в задаче экстракции ионов при лазерном разделении изотопов. Показана некорректность применения моделей Пуассона – Больцмана и гидродинамических уравнений Эйлера для бесстолкновительной плазмы.

В работах [1, 2] приведены результаты математического моделирования бесстолкновительной плазмы для решения проблемы экстракции ионов из плазменного сгустка при лазерном разделении изотопов. Использование модели Пуассона – Больцмана и гидродинамической модели Эйлера не соответствует их области применимости.

В работе [1] решается задача о прохождении бесстолкновительной плазмы через ячейки сетки, вытягивающей ионы. Схема экстракции ионов из плазмы с помощью двух сеток, к которым прикладывается разность потенциалов, впервые рассмотрена 20 лет назад [3] в связи с проблемой формирования ионных пучков. Сейчас используются другие, более эффективные схемы [4]. Работа представляла бы методический интерес как начальное рассмотрение, но вызывают сомнения корректность постановок задачи и некоторые утверждения.

Во-первых, представление электронной плотности в виде барометрической формулы Больцмана с переменным множителем перед экспонентой никак авторами не обосновано. В работе [1] решается уравнение Пуассона – Больцмана, которое записано в следующем виде:

$$-\Delta\varphi(x, y) = 4\pi e[n_i(x, y) - n_i(x, y) \exp(-e\varphi/T_e)]. \quad (1)$$

Общепринятая форма уравнения электростатики

$$-\Delta\varphi(x, y) = 4\pi e[n_i(x, y) - n_{i0} \exp(-e\varphi/T_e)], \quad (2)$$

где n_{i0} – плотность ионов в точке с нулевым потенциалом. Уравнение (1) не описывает ни электростатический случай, ни режим протекания слабого тока. Но даже верное при определенных условиях уравнение (2) явно не соответствует кинетике рассматриваемого процесса переноса в сильно неравновесной системе с большими токами. Выбор модели (1) для описания электронной плотности требует обоснования. Нужен ответ на вопрос: как эта модель согласуется с уравнением Власова для бесстолкновительной плазмы, которое является наиболее простой моделью, адекватной рассмотренной задаче.

Во-вторых, использование в модели электронной температуры предполагает близость функции распределения электронов к максвелловской. Но в бесстолкновительной плазме с сильными полями и неоднородной плотностью функция распределения электронов по скоростям кардинально отличается от распределения Максвелла: она сильно анизотропна, и средняя кинетическая энергия электронов зависит от координат. Однако в работе [1] используется постоянное значение электронной температуры 0.17 эВ при напряжении на электродах 100 В .

В-третьих, утверждение о том, что "результаты расчета допускают масштабирование, поскольку уравнение Пуассона можно привести к безразмерному виду", для рассматриваемой системы (неравновесной плазмы) неверно, т.к. критерием подобия термодинамических характеристик равновесной плазмы является показатель неидеальности плазмы [5]. Для систем с пространственной неоднородностью требуется также подобие отношения дебаевского радиуса к линейному размеру. Ни один из этих критериев в приведенных расчетах не выполняется. Следовательно, из-за того, что плотность частиц в расчете (10^8 см^{-3}) на четыре порядка меньше реальной, нельзя переносить результаты расчета на действительный эксперимент, даже если бы они были верны.

Современные экспериментальные методы формирования интенсивных ионных пучков хорошо развиты, их теоретическое сопровождение имеет в своем арсенале мощные, современные компьютерные коды [4, 6]. Схема же экстракции ионов из плазмы, используемая в [1], не нова, методика ее математического исследования имеет существенные недостатки как в постановочной части, так и в алгоритмической реализации.

В работе [2] исследован эффект запираания бесстолкновительной плазмы электрическим полем замкнутой конфигурации на основе численного решения уравнений двухжидкостной бесстолкновительной газодинамики. Но уравнения Эйлера для анализа бесстолкновительной плазмы не применимы. Условием применимости гидродинамической

модели является критерий Кнудсена – малость длины свободного пробега в сравнении с характерным размером изменения гидродинамических параметров. В бесстолкновительной плазме этот критерий не выполняется. При обычных для лазерного разделения изотопов условиях радиус Дебая много меньше характерных линейных размеров и существенного разделения электронов и ионов не происходит. Но квазинейтральность плазмы еще не позволяет использовать гидродинамическую модель: в рассмотренной бесстолкновительной системе нет механизма, заменяющего столкновения частиц и приводящего к формированию сдвинутой максвелловской функции распределения. Работа сил давления в уравнениях гидродинамики также не поддерживается каким-либо механизмом в бесстолкновительной системе. Обычно для описания эффектов, обусловленных конечной длиной свободного пробега, в уравнения гидродинамики дописывают диссипативные члены, получая уравнения Навье – Стокса. Но даже область применимости уравнений Навье – Стокса не включает рассмотренный случай бесстолкновительной плазмы.

Самосогласованные задачи устойчивы к возмущениям, и если они основываются на законах сохранения, то результаты моделирования в худшем случае позволяют проводить оценки процессов по порядку величины. Но точность решения соответствует при этом примерно точности анализа на основе размерностей. Для многопараметрической задачи динамики плазмы размерностный анализ может давать неверный знак: вместо эффекта запираания может иметь место прохождение плазмы. Поэтому все же лучше использовать модели, адекватные натурным экспериментам. Тем более, что современные компьютеры и численные методы физики плазмы позволяют решать такие и более сложные задачи. Анализируются двух, трехмерные стационарные и нестационарные задачи на основе не только гидродинамических моделей, но и более сложных – кинетических уравнений Власова, Больцмана. Для рассмотренных задач достаточно было использовать уравнение Власова. Это минимально сложная модель, отвечающая физике задачи. Ни электростатическая модель на основе уравнения Пуассона – Больцмана, ни гидродинамическая модель на основе уравнений Эйлера не позволяют исследовать динамику плазменного сгустка в бесстолкновительном режиме при больших токах и потенциалах на контактах.

Проблема лазерного разделения изотопов в научном аспекте давно решена [7]. Еще в 1975 г. в Ливерморе получено весовое количество разделенного продукта, в 1985 г. построен модуль SDF с загрузкой 5 тонн урана, сейчас после опытной эксплуатации обсуждается целесообразность строительства завода с производительностью 1700

тонн/год. Образцы промышленных установок имеют Франция и Япония. Сейчас обсуждается экономическая, экологическая и геополитическая целесообразность различных методов. Конечно, возможна научная деятельность в этой области по поиску принципиально новых схем разделения и новых идей при разработке оборудования. Но обсуждение начальных физических принципов экстракции ионов простейшим электростатическим способом является, мягко говоря, неактуальной задачей. Поэтому я считаю достаточным только краткий комментарий, затрагивающий вопросы обоснованности физической постановки задачи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Голятина Р. И., Сыцко Ю. И., Яковленко С. И. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 7, 3 (1998).
- [2] Савельев В. В., Яковленко С. И. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11-12, 57 (1997); Квантовая электроника, **23**, N 11, 1020 (1996).
- [3] Crow J. T., Forrester A. T., and Goebel D. M. IEEE Trans. Plasma Sci., **PS-6**, 535 (1978).
- [4] Форрестер А. Т. Интенсивные ионные пучки. М., Мир, 1992.
- [5] Эбелинг В., Крефт В., Кремп В. Теория связанных состояний и ионизационного равновесия в плазме и твердом теле. М., Мир, 1979.
- [6] Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М., Мир, 1987.
- [7] Proceedings SPIE, **1859**, 1993.

Институт общей физики РАН

Поступила в редакцию 20 января 1999 г.