

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖАТИЯ РЕАГИРУЮЩЕГО ГАЗООБРАЗНОГО ДЕЙТЕРИЯ

И.Б. Палымский

Бурное развитие вычислительной сделало возможным проведение расчетов течений методом молекулярной динамики. Основные трудности возникают при учете взаимодействий между частицами газа. В случае движения заряженных частиц взаимодействие имеет коллективный характер, что делает необходимым учет всех парных взаимодействий. Как следствие, растущий при этом как $O(N^2)$ объем вычислений делает такие расчеты чрезвычайно затратными и возможными только при использовании графических ускорителей [1].

Физическая постановка рассматриваемой задачи в целом следует схеме электростатического удержания плазмы (ИЕС), где разность потенциалов порядка 100кВ создает импульсно электростатическое поле между отрицательно заряженным полым сетчатым катодом в центре области и положительно заряженным анодом на внешней границе. В результате эмитированные из катода электроны двигаются к внешней границе, образуя в междуэлектродном пространстве квазистационарный виртуальный катод, блокирующий дальнейшую эмиссию электронов и соответствующую потенциальную яму, а выбитые из анода из дейтерированного палладия и ускоренные в потенциальной яме ионы дейтерия, проходя без захвата облако электронов, двигаются к центру области внутрь полого катода, где потоки ионов сталкиваются и наблюдаются термоядерные реакции D-D и T-D типов. Возникающее при попадании на анод ускоренных электронов рентгеновское излучение в данной работе не рассматривается.

Созданные и известные как фузоры Фарнсуорта-Хирша ИЕС технические устройства используются в качестве источников нейтронов. Хотя получаемые нейтроны имеют термоядерный характер, энергетическая эффективность таких установок невелика (отношение полученной энергии к затраченной $Q \sim 10^{-6} - 10^{-8}$) и использование их в качестве реакторов пока не предполагается.

Некоторым шагом вперед является создание ИЕС установки наносекундного вакуумного разряда (НВР). При разности потенциалов $U = 70\text{кВ}$ энергетическая эффективность НВР установки примерно на два порядка выше, чем у установок использующих энергию мощного лазерного или рентгеновского излучения [2].

В [3] представлены результаты численного моделирования ИЕС физических процессов методом частиц, исследована роль междуэлектродной потенциальной ямы, выявлена ее структура. Но отметим, что рассматриваемая в полной физической постановке задача крайне сложна и неизбежно возникающая при таком моделировании необходимость использования не вполне обоснованных уравнений и дополнительных физических предположений сильно снижает ценность полученных результатов.

В данной работе методом частиц рассчитывается движение и взаимодействие ускоренных ионов дейтерия вблизи центра области внутри сетчатого катода. Внутри катода внешнее электростатическое поле отсутствует и потоки ионов двигаются к центру по инерции, сталкиваясь и инициируя реакции D-D и T-D типов. Цель данной работы продемонстрировать принципиальную возможность численного моделирования инерционного сжатия газообразного дейтерия с протеканием термоядерных реакций.

Для простоты задача решается в двумерной постановке, в начальный момент 5000 ускоренных ионов дейтерия расположены в тонком кольце внешнего радиуса $2 \cdot 10^{-10}\text{м}$, все частицы имеют равную энергию и их скорости направлены к центру области. Счита-

ется, что каждая частица движется согласно второму закону классической динамики Ньютона с учетом всех парных междучастичных сил Кулоновского отталкивания.

Для численного интегрирования используется известная схема второго порядка по времени чехарда (leapfrog) с переменным шагом интегрирования, согласно которой сначала на полуцелых шагах по времени определяются скорости, а затем на целых шагах положения частиц.

Радиус действия ядерных сил принят равным $r_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ м с величиной потенциального барьера $P_b = 0.72$ МэВ. Предполагается, что между заряженными ионами может протекать реакция, если частицы сближаются на расстояние меньше удвоенного радиуса ядра дейтерия $r_1 = 4.8 \cdot r_0 = 9.6 \cdot 10^{-15}$ м. Как правило, энергия ионов значительно меньше величины потенциального барьера и взаимодействие ионов носит квантовый характер, поэтому вероятность протекания реакции вычисляется по формуле Г. Гамова как вероятность туннельного перехода.

Учитываются два равновероятных канала протекания D-D реакции:

${}^2_1D + {}^2_1D = {}^3_1T + p + 4\text{МэВ}$ (1), ${}^2_1D + {}^2_1D = {}^3_2\text{He} + n + 3.3\text{МэВ}$, а образовавшиеся при этом ядра трития при благоприятных условиях вступают в T-D реакцию: ${}^3_1T + {}^2_1D = {}^4_2\text{He} + n + 17.6\text{МэВ}$. При этом выполняются законы сохранения импульса и энергии, а вероятностный характер взаимодействия учитывается в компьютерной программе с помощью генератора случайных чисел.

Анализ расчетов показывает формирование сходящейся ударной волны, приводящей к скачку плотности, давления и температуры в центре. Сжатие вещества в центре области обуславливает протекание реакций с выделением энергии и рассеянием газового облака.

На рис. 1 приведена энергетическая эффективность Q как функция приложенного напряжения U . Видно, что значения Q сильно завышены, что обусловлено двумерной постановкой задачи и искусственно четкой фокусировкой потоков ионов в центре области. Однако значение $U = 100$ кВ, начиная с которого наблюдается заметный рост энерговыхода Q представляется реальным.

На рис. 2 показана функция распределения энергии при $U = 72$ кВ, $t = 0.793$ и $E_k \leq P_b$. Видно, что полученное в эксперименте [2] с анодом из дейтерированного палладия при $U = 70$ кВ максимальное значение энергии частиц ~ 3 МэВ хорошо согласуется с данными расчетов (пик 1), а также разумное согласование имеет максимальное значение энергии частиц в эксперименте с железным анодом ~ 300 кэВ с расчетным значением 255 кэВ без учета реакций. Положения пиков на рис. 2 примерно соответствуют энергиям легких частиц – продуктов реакций D-D и T-D типов.

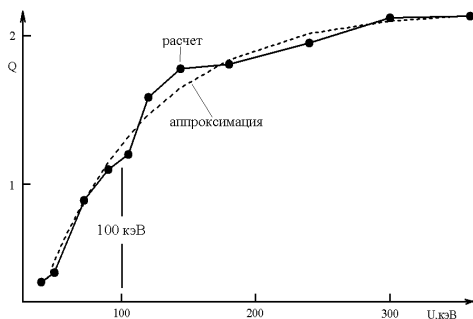


Рис. 1. Энергетическая эффективность.

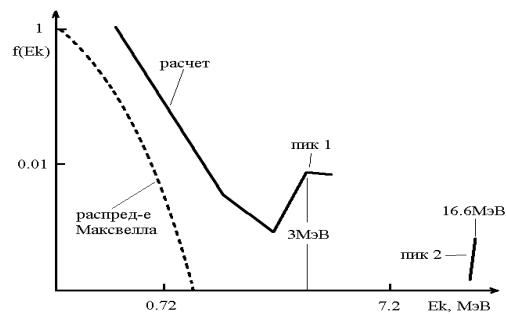


Рис. 2. Функция распределения энергии.

В дальнейшем планируется увеличить число частиц и выполнить расчеты трехмерной задачи. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ грант №15-08-05166.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боярченко А.С., Поташников С.И.** Использование графических процессоров и технологии CUDA для задач молекулярной динамики // Вычислительные методы и программирование.-2009.-Т.10.-С.9-23.
2. **Kurilenkov Yu.K. et al.** Multiple DD fusion events at interelectrode media of nanosecond vacuum discharge // J. Phys. A: Math. Gen.-2006-V.39-P.4375-4386.
3. **Kurilenkov Yu.K. et al.** Inertial electrostatic confinement and DD fusion at interelectrode media of nanosecond vacuum discharge. PIC simulations and experiment // J. Phys. A: Math. Theor.-2009-V.42-P.214041.