

Инжектор ксеноновых макрочастиц для гашения термоядерной реакции в токамаке

© П.В. Резниченко, И.В. Виняр, Б.В. Кутеев

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 7 июля 1998 г. В окончательной редакции 18 февраля 1999 г.)

На основе легкогазовой пушки разработан инжектор для формирования и инжекции макрочастиц из твердого ксенона в плазму токамака. Представлены результаты экспериментов и расчетов по изготовлению непосредственно внутри ствола ксеноновых макрочастиц диаметром 4 мм и длиной до 25 мм.

Введение

При срыве разряда в токамаке высокотемпературная плазма падает на диверторные пластины и может их разрушить. Для предотвращения локального выделения энергии плазмы в диверторе было предложено быстро гасить разряд и переводить энергию плазмы в лучистую форму путем инжекции макрочастиц из замороженных инертных газов, обладающих большим зарядом ядра [1]. Инжекция макрочастиц из отвержденных газов в термоядерные установки широко применяется как для ввода топлива, так и для диагностики плазмы [2]. Чаще всего для ввода топлива используют инжекторы на основе легкогазовой пушки, в казенной части которой газообразный водород (или дейтерий) замораживается в виде макрочастицы. Легкий вес водорода облегчает формирование макрочастицы из конденсированной фазы, поскольку силы поверхностного натяжения препятствуют растеканию жидкой капли по стекам ствола. В случае относительно тяжелых инертных газов необходимо было разработать инжектор с иным способом формирования макрочастиц, описанный в данной работе.

Конструкции и принцип работы инжектора

Схема инжектора представлена на рис. 1, *a*. К тонкостенному участку ствола 1 одностунчатой легкогазовой пушки припаян медный стержень 2 прямоугольного сечения 8×24 мм длиной 0,2 м. Второй конец стержня опущен в емкость с жидким азотом 3. Внутренний диаметр ствола равен 4 мм, а его длина — 0,8 м. К стержню на расстоянии 8 мм от оси ствола прикреплен полупроводниковый датчик температуры 4 с интервалом измерений от 5 до 273 К. Ствол оснащен электромагнитным импульсным клапаном 5, к которому присоединен баллон 6 с редуктором, заполненный сжатым гелием или водородом. Клапан имеет внутренний объем камеры 70 см^3 и способен открываться за 1 мс при давлении гелия или водорода до 12 МПа. Конец ствола вставлен в диагностическую камеру 7, которая оснащена оптическим датчиком 8 с двумя фотодиодами, расположенными вдоль оси ствола на расстоянии 10 мм друг от друга.

К фланцу камеры прикреплен микрофон 9. Фотодиоды освещены лазерным лучом 10, расширенным до диаметра 15 мм.

Заполненный ксеноном баллон 11 с редуктором присоединен к диагностической камере, импульсному клапану и вакуумному насосу 13 системой трубопроводов с вентилями 12, 14–16.

Для визуализации наблюдения за формированием макрочастиц вместо импульсного клапана к началу ствола мог быть прикреплен блок 17 с оптическим окном, как показано на рис. 1, *b*. В этом случае импульсный клапан присоединялся к боковой поверхности блока, а в ствол направляли луч света через окна диагностической камеры.

Для качественной оценки прочности изготовленных макрочастиц к концу ствола вместо диагностической камеры мог быть прикреплен также пьезоэлектрический датчик давления 18 (рис. 1, *b*). По величине и форме импульса давления, создаваемого в стволе перед макрочастицей 19 при ее ускорении, можно было судить о механической прочности замороженной макрочастицы.

Принцип работы инжектора поясняется рис. 1. Участок ствола охлаждается до температуры 135–140 К, при которой замерзает ксенон, подаваемый в ствол через вентиль 12 и диагностическую камеру. После формирования макрочастицы по методике, описанной ниже, баллон с ксеноном закрывается, а насос 13 вакуумирует ствол с обеих сторон от частицы через клапан 5, вентили 16, 14 и диагностическую камеру. Конструкция клапана позволяет держать его постоянно открытым в течение нескольких десятков секунд без перегрева обмоток. После вакуумирования ствола клапан 5 закрывается и в его камеру подается сжатый гелий из баллона 6. При импульсном открытии клапана газ под давлением 1–10 МПа проникает в ствол и ускоряет макрочастицу.

Методика и результаты экспериментов

Среди инертных газов с большим зарядом ядра для экспериментов был выбран ксенон, так как температура его тройной точки составляет 161,4 К. Это позволяло легко получать твердую фазу, используя для охлаждения жидкий азот.

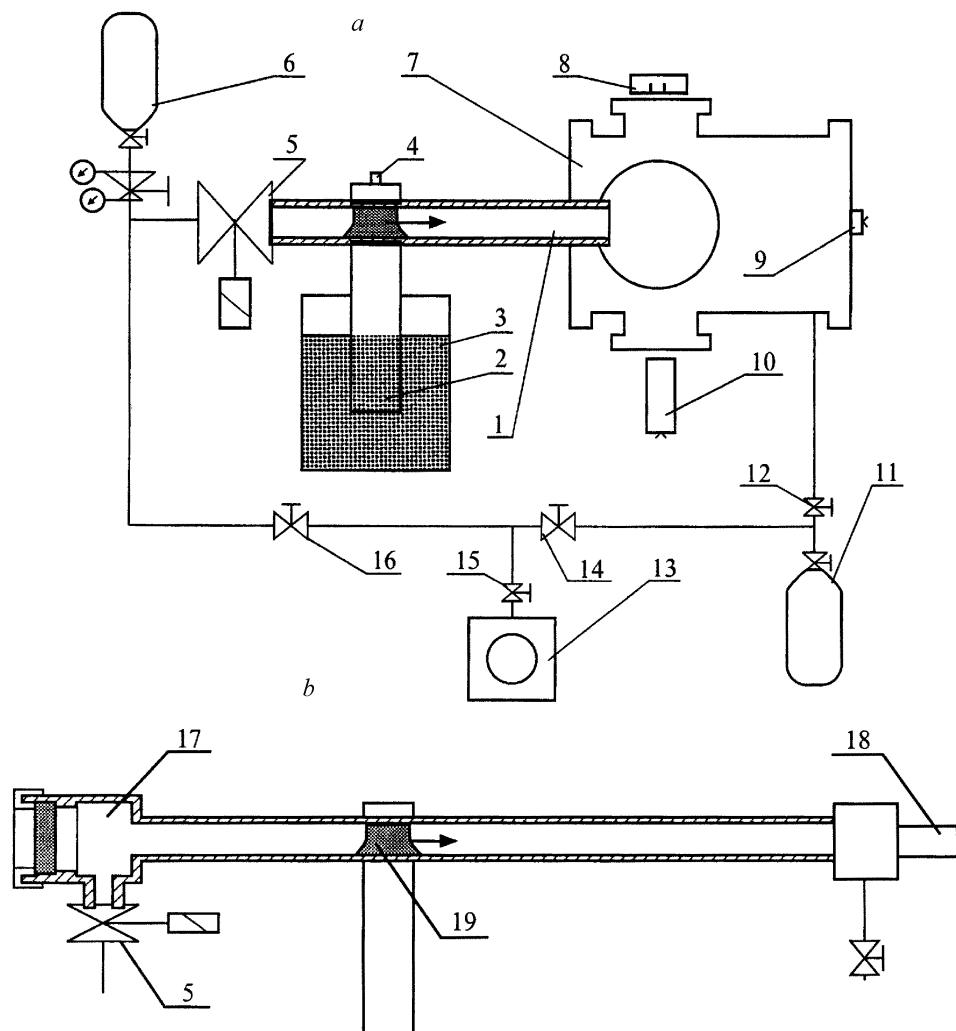


Рис. 1. Схема инжектора макрочастиц (а) и модификация его ствола (b).

Первые эксперименты показали, что при давлении ниже давления в тройной точке ксенона, равного 0,08 МПа, макрочастицы формировались в виде рыхлого снежного цилиндра, который легко разрушался при ускорении. При давлениях и температурах выше тройной точки было обнаружено, что жидкий ксенон в отличие от жидкого водорода [3] растекался вдоль ствола и не образовывал компактной макрочастицы. У жидкого ксенона вблизи тройной точки отношение коэффициента поверхностного натяжения к плотности почти в 7 раз меньше, чем у жидкого водорода, поэтому сил поверхностного натяжения недостаточно для того, чтобы удерживать каплю в трубе с внутренним диаметром 4 мм. Была разработана следующая методика формирования твердых макрочастиц.

После вакуумирования ствола до 2–3 Ра и охлаждения медного стержня до 135–140 К газообразный ксенон подавался в ствол со стороны диагностической камеры под давлением 0,1 МПа, как показано на рис. 2, а. Спустя 5–10 с на стенках ствола появлялся тонкий слой твердого ксенона. Вентиль 14 закрывался, клапан 5 открывался полностью, а вентили 15 и 16 слегка приоткрывались,

обеспечивая медленную откачку ксенона со стороны импульсного клапана (рис. 1, а). Тем самым создавался слабый поток ксенона сквозь охлажденный участок ствола, как показано на рис. 2, б. Поток ксенона и скорость нарастания слоя жидкого ксенона были настолько малы, что жидкость успевала затвердеть, почти не растекаясь вдоль ствола. Сквозь ствол можно было наблюдать, как сечение ствола заполнялось твердым ксеноном снизу вверх, образуя некоторое подобие пирамиды, как показано на рис. 2, б. Спустя примерно 100 с вершина пирамиды достигала верхней точки внутренней поверхности ствола и поток ксенона сквозь ствол прекращался. После этого вентиль 14 приоткрывался и за счет вакуумирования давление ксенона понижалось до 0,02 МПа. Затем закрывался вентиль 15 и газ продолжал конденсироваться с двух противоположных сторон на сформированную в стволе перемычку из твердого ксенона, как показано на рис. 2, с. При этом температуру медного стержня понижали до 125–130 К за счет увеличения части его длины, погруженной в сосуд с жидким азотом. Спустя 120–180 с макрочастица приобретала окончательный вид

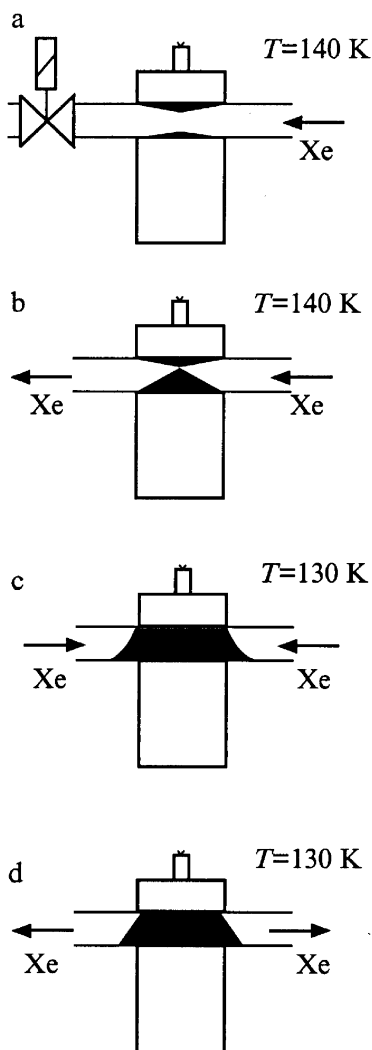


Рис. 2. Этапы формирования ксеноновой макрочастицы внутри ствола: *a* — напуск и формирование слоя твердого ксенона на стенках ствола, *b* — продувка ксенона и формирование пирамиды твердого ксенона, *c* — конденсация ксенона с противоположных сторон и формирование усеченной пирамиды, *d* — сублимация ксенона в вакуум.

усеченной пирамиды (рис. 2, *c*). Непосредственно перед выстрелом макрочастицу выдерживали 60–90 с в вакууме, как показано на рис. 2, *d*, для того, чтобы за счет сублимации ослабить ее примерзание к стволу.

По данной методике стабильно формировались макрочастицы диаметром 4 мм и длиной до 25 мм. Время формирования составляло около 360 с. Иногда для проверки прочности сформированной макрочастицы открывался импульсный клапан и гелий под давлением до 0.1 МПа подавался в ствол. Правильно изготовленная макрочастица выдерживала такое давление без пропускания гелия в диагностическую камеру, что свидетельствовало о том, что она сформировалась из ксенонового льда, а не снега.

Выстрел производился сжатым до 1–10 МПа гелием, поступающим в ствол из импульсного клапана. Макро-

частица вылетала в диагностическую камеру и последовательно закрывала оба фотодиода от падающего на них лазерного света. Электронная система в этот момент формировала импульс, характерный вид которого показан на рис. 3. Импульс без задержки поступал на запуск фотовспышки, которая производила подсветку макрочастицы в полете длительностью 40 ns. Фотоаппарат или видеокамера регистрировали тень фотографию частицы. Последняя ударялась о фланец камеры, имевший мембрану с укрепленным на ней с внешней стороны микрофоном. Сигнал микрофона вместе с сигналами фотодиодов записывались на запоминающий осциллограф. По расстоянию между фотодиодами и микрофоном и задержками по времени между сигналами на осциллографе рассчитывалась скорость макрочастиц. Типичная осциллограмма, на которой видны передний фронт импульса 1, сформированного первым фотодиодом в момент его затемнения передней частью макрочастицы, длительность самого импульса, характеризующего скорость и размер частицы во время затемнения обоих фотодиодов, задний фронт импульса 2, сформированный в момент пролета задней части макрочастицы мимо второго фотодиода, а также сигнал микрофона 3 в момент удара в него частицы, представлены на рис. 3. По времени между сигналами 1 и 3 и расстоянию между первым фотодиодом и микрофоном рассчитывалась скорость макрочастицы. По времени между сигналами 1 и 2 и расстоянию между фотодиодами оценивалась длина макрочастицы после ускорения исходя из полученной скорости.

В результате экспериментов были получены скорости макрочастиц в зависимости от давления толкающего газа (гелия или азота), представленные на рис. 4. Максимальная скорость достигала 300 м/с для частиц диаметром 4 мм и длиной 25 мм. Такая скорость достаточна для ввода частицы за диверторный слой и гашения разряда в поверхностном слое плазмы с переизлучением энергии на всю внутреннюю поверхность камеры токамака. Однако для полного гашения разряда необходимо увеличить скорость макрочастиц, например, за счет применения

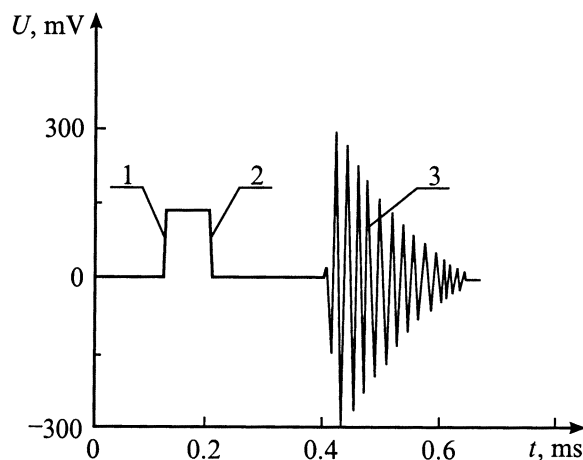


Рис. 3. Осциллограмма сигналов фотодиодов (1, 2) и микрофона (3) от летящей макрочастицы.

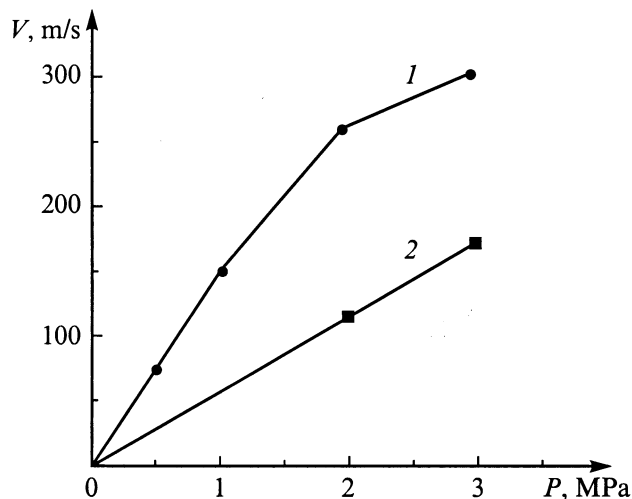


Рис. 4. Зависимость скорости макрочастицы ксенона от давления газа: 1 — гелий, 2 — азот.

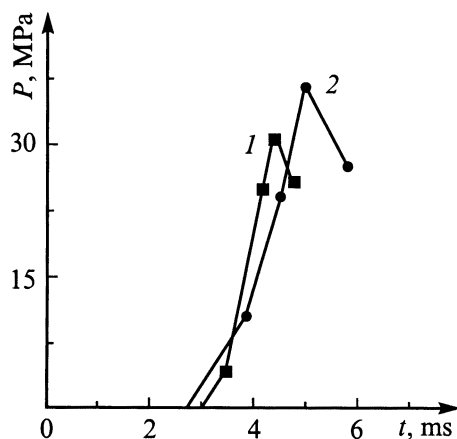


Рис. 5. Импульсы давления P , создаваемого в газе перед ускоряемой макрочастицей. Начальное давление азота, МПа: 1 — 0.2, 2 — 0.3.

двухступенчатой легкогазовой пушки. Поскольку в двухступенчатых пушках из-за износа поршня во второй ступени приходится их часто заменять [4], то было предложено формировать из газа одноразовый поршень одновременно с макрочастицей [5]. В экспериментах при выстреле в ствол, заполненный предварительно гелием под давлением 0.01–0.4 МПа и закрытый пьезодатчиком давления, как показано на рис. 1, б, были получены импульсы давления газа перед макрочастицей, достигающие в пике свыше 100 МПа. Типичные формы импульсов при использовании для ускорения макрочастицы азота под давлением 5 МПа и также азота перед макрочастицей при начальном давлении 0.2 и 0.3 МПа показаны на рис. 5. Видно, что прочность ксеноновых макрочастиц и длительность импульсов давления достаточны для того, чтобы использовать разработанную технологию для формирования одноразовых поршней в двухступенчатых пушках и тем самым решить проблему их живучести.

Кроме того, на основе модели расчета двухступенчатых пушек, разработанной в [6], можно оценить скорость макрочастицы твердого водорода в случае, если газ во второй ступени сжимается поршнем, идентичным изготовленному нами в экспериментах. Если начальное давление гелия во второй ступени перед сжатием ксеноновым поршнем равнялось 0.4 МПа, а после сжатия достигало в экспериментах 100 МПа, то, полагая сжатие адиабатическим, получим температуру сжатого газа, превышающую 3000 К. Скорость макрочастицы приближенно равна скорости звука в газе, умноженной на некоторые поправочные коэффициенты, учитывающие трение, теплоотдачу от газа в ствол, реальные свойства газа, отношение массы ускоряющего газа к массе макрочастицы и конструктивные параметры двухступенчатой пушки. При правильном выборе размеров ствола, макрочастицы, второй и первой ступени пушки все эти коэффициенты увеличивают скорость макрочастицы в 1.8–2.5 раза по сравнению со скоростью звука [6]. Учитывая, что в экспериментах скорость звука в сжатом газе составляла 3.2 км/с, можно сделать вывод, что применение поршня, изготовленного нами из твердого ксенона, во второй ступени двухступенчатой пушки позволило бы ускорить макрочастицу твердого водорода размером 1–2 мм до скорости свыше 3 км/с.

Заключение

В работе описана новая технология формирования макрочастиц из твердого ксенона, которая может использоваться в инжекторах для ввода макрочастиц в плазму токамаков с целью предотвращения срыва разряда и выброса энергии плазмы в дивертор. Для реализации этой технологии был создан инжектор, в котором формировались и ускорялись до 300 м/с макрочастицы диаметром 4 мм и длиной до 25 мм. Время цикла формирования и ускорения макрочастиц составляло около 360 с. Экспериментально показано, что макрочастицы при ускорении могут создавать в газе перед собой импульс давления амплитудой свыше 100 МПа, поэтому они могут быть использованы также в качестве одноразовых поршней в двухступенчатых легкогазовых пушках для ускорения макрочастиц, в том числе из твердых изотопов водорода, до скоростей свыше 3 км/с.

Список литературы

- [1] Kuteev B.V., Sergeev V.Yu., Sudo S. // Nucl. Fusion. 1995. Vol. 35. P. 1167–1172.
- [2] Milora S., Houlberg W., Lenguel L., Mertens V. // Nucl. Fusion. 1995. Vol. 35. P. 657–754.
- [3] Combs S. // Rev. Sci. Instr. 1993. Vol. 64. P. 1679–1698.
- [4] Sudo S., Baba T., Kanno M., Saka S. // Fusion Technol. 1991. Vol. 20. P. 387–398.
- [5] Виняр И.В. Патент РФ. БИ. 1997. № 1699298. Т. 15. С. 223.
- [6] Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Н.А. Златина, Г.И. Мишина. М.: Наука, 1974. 344 с.