

04;12

Периодический инжектор с пористым формователем макрочастиц для ввода топлива в плазму

© И.В. Виняр

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

(Поступило в Редакцию 21 января 1998 г.)

Разработан десятиствольный пневматический инжектор для периодического ввода топливных макрочастиц в стационарно работающие термоядерные установки. Макрочастицы твердого водорода диаметром 2.7 мкм и длиной от 3 до 4 мкм формировались в одном стволе с частотой 0.1–0.2 Hz при периодическом импульсном нагреве пористой втулки, непрерывно заполняемой водородом и охлаждаемой жидким гелием, и ускорялись до 1–1.2 км/с.

Введение

Термоядерные реакторы должны быть оснащены системами ввода топлива для работы в стационарном режиме. Наряду с напуском газа предполагается вводить в реакторы макрочастицы из твердых изотопов водорода, которые глубже проникают в плазму, положительно влияя на ее параметры [1]. Ключевой задачей при этом является разработка надежного инжектора, способного вводить в глубинные зоны плазмы топливные макрочастицы в непрерывном периодическом режиме с частотой 1–10 Hz. Уже предложены три способа непрерывного формирования и инъекции макрочастиц в периодическом режиме. В первом из них макрочастицы создаются за счет экструзии: либо при попеременной работе 2–3 экструдеров поршневого типа [2,3], либо при помощи экструдера с "газовым поршнем" [4], либо шнековым экструдером [5]. Во втором способе топливный газ непрерывно намораживается на обод вращающегося диска и полученный лед срезается, образуя макрочастицы [6]. В недавно предложенном третьем способе макрочастицы образуются за счет плавления небольшого объема предварительно замороженного топлива с последующим его проникновением в ствол сквозь пористый материал и замерзанием там [7]. В созданном по этой технологии одноствольном инжекторе была продемонстрирована инъекция макрочастиц с частотой около 0.05 Hz, которая увеличивалась до 0.1 Hz при стрельбе сериями по 3–5 макрочастиц [8]. Для увеличения частоты инъекции свыше 0.1 Hz был создан многоствольный инжектор, описанный в данной работе.

Конструкция и принцип работы инжектора

Инжектор состоит из десяти одноступенчатых легкогазовых пушек с формователями макрочастиц, диагностической камеры, оснащенной гелий-неоновым лазером и фотодетектором для фиксации момента пролета макрочастицы, системы вакуумирования, стойки электронных

блоков питания исполнительных элементов, включая логический контроллер. При стыковке с термоядерной установкой между нею и инжектором устанавливаются система дифференциальной откачки с направляющими трубками для пролета частиц и микроволновый измеритель их массы. Схема конструкции инжектора приведена на рис. 1. Легкогазовые пушки установлены в два ряда по пять пушек в ряд. Каждая из них оснащена импульсным клапаном 2 для ввода в ствол ускоряющего газа, клапаном 5 ввода топливного газа в свой независимый пористый формователь 1 и шиберным затвором 9. Клапаны с ускоряющим и топливным газом установлены в верхней части переднего фланца криогенной камеры 8, внутри которой расположены пористые формователи частиц и стволы 6, защищенные тепловым экраном 7. К нижней части переднего фланца прикреплены десять низкотеплопроводных вентилей 3, которые регулируют поток паров жидкого гелия сквозь теплообменники десяти пористых формователей. Четыре вакуумноплотных разъема для вывода из камеры проводов от нагревателей и датчиков температуры также размещены на переднем фланце. Шиберные затворы выполнены в двух одинаковых алюминиевых корпусах по пять в ряд. Затвор представляет собой стальную пластину с отверстием диаметром 4 мм для пролета частицы, сжатую между двумя фторопластовыми прокладками. Пластина перемещается под действием электромагнитов и за 3–5 мс герметично закрывает/открывает объем ствола от диагностической камеры 10. Последняя герметично соединена с двумя корпусами шиберных затворов и имеет две пары окон для регистрации пролета частиц мимо фотодетектора, освещенного лазерным лучом, и видеозаписи их в полете при подсветке наноимпульсной вспышкой. Диагностическая камера может вращаться и фиксироваться в любом положении. Ее фланец, расположенный напротив стволов, изготовлен из полиметилметакрилата. Сквозь него луч света можно было направлять в ствол так, что при боковом размещении клапана с ускоряющим газом легко было наблюдать за формированием макрочастицы непосредственно в стволе.

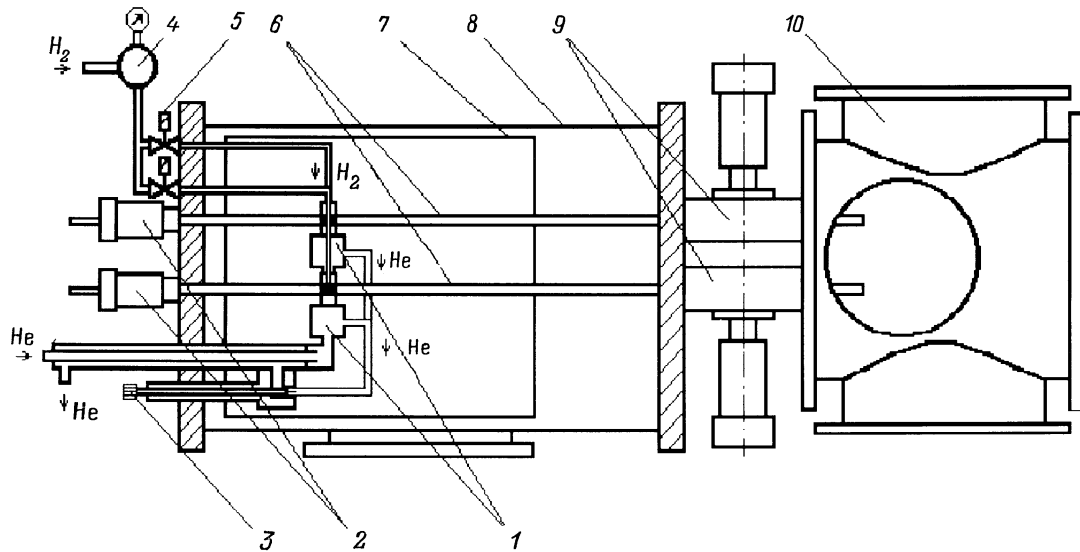


Рис. 1. Схема многоствольного инжектора с пористыми формователями топливных макрочастиц.

Топливный газ подается через клапаны 5 к каждому пористому формователю из коллектора 4, оснащенного манометром. Ускоряющий газ поступает из баллона с редуктором прямо в десять импульсных электромагнитных клапанов пилотного типа с внутренним объемом 6 см^3 и временем открытия/закрытия около 1 мс . Криогенная и диагностическая камеры оснащены вакуумными датчиками и откачиваются турбомолекулярным и форвакуумным насосами соответственно.

Основным элементом конструкции инжектора, определяющим частоту инъекции, является формователь макрочастиц. Схема одного из пористых формователей

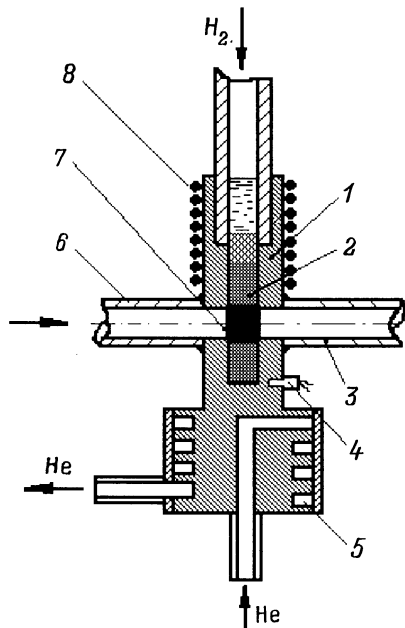


Рис. 2. Схема пористого формователя макрочастиц.

приведена на рис. 2. Он изготовлен из блока высокотеплопроводной меди 1, в который впрессован ряд медных сеток с размером ячейки менее 0.07 мм . В сетках вдоль одной оси проделаны отверстия, равные внутреннему диаметру ствола. К полученной пористой втулке 2 с двух противоположных сторон припаяны ствол 3 и трубка 6 для подвода ускоряющего газа. В нижней части формователя нарезан канал теплообменника 5, а в верхней части выполнено отверстие, соединяющее пористую втулку с трубкой подвода топливного газа. Датчик температуры 4 прикреплен к средней части формователя, а на верхнюю часть намотана манганиновая проволока сопротивлением 20Ω в качестве нагревателя 8.

Во время работы инжектора пар жидкого гелия постоянно циркулирует по теплообменнику и охлаждает пористую втулку. Ускоряющий газ при выстреле пролетает сквозь ствол, выталкивая из него макрочастицу 7, и нагревает пористую втулку с замороженным в ней топливом. Топливо, а им являются изотопы водорода с температурой тройной точки от 14 до 20.6 К , плавится в порах и проникает в ствол. Там оно замерзает, формируя новую макрочастицу. Ускоряющий газ при очередном выстреле выталкивает ее из ствола и цикл повторяется.

Экспериментальные результаты

Цель первого этапа экспериментов состояла в определении минимального времени формирования макрочастицы. В связи с этим испытания проводились с различными конструкциями формователей, но при стрельбе из одного ствола. Ниже представлены результаты экспериментов с водородными макрочастицами, поскольку при экспериментах с дейтерием существенных различий в длительности процессов не обнаружено.

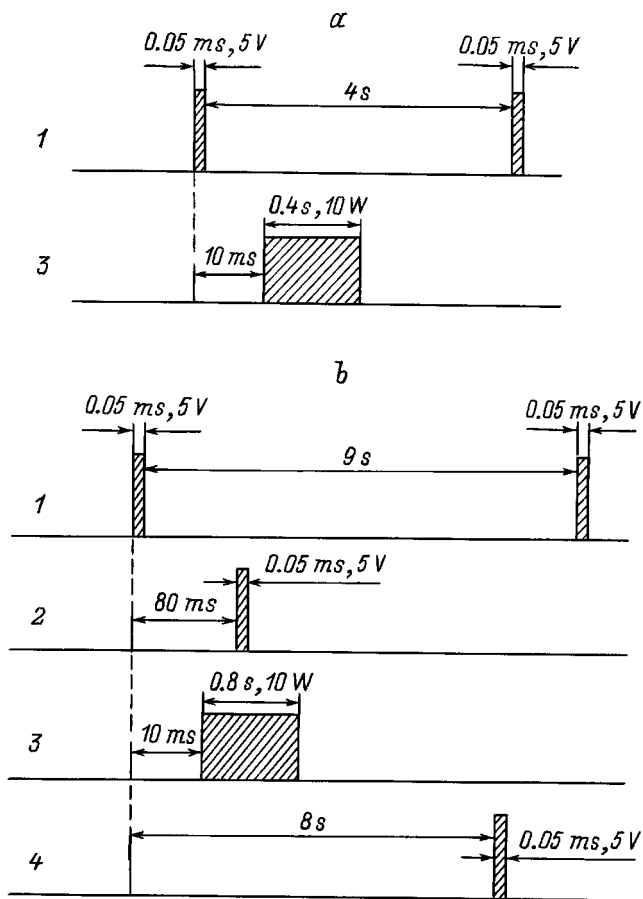


Рис. 3. Эпюры импульсов при формировании и инжекции макрочастиц в режимах экструзии (а) и плавления (b): 1 — открытие клапана с ускоряющим газом, 2 — закрытие шибера, 3 — включение нагревателя, 4 — открытие шибера.

При испытаниях инжектора были реализованы два режима формирования макрочастиц. В первом режиме твердый водород расплавляли в порах формователя и жидкую каплю замораживали в стволе. Во втором режиме твердый водород нагревали в порах до предплавильных температур (около 13 К) и пластичный водород экструдировали сквозь поры в ствол, а затем охлаждали. Последовательности рабочих импульсов, вырабатываемых логическим контроллером в циклах инжекции макрочастиц в этих режимах, приведены на рис. 3. В обоих режимах цикл инжекции начинался импульсом, открывшим клапан с ускоряющим газом. Спустя 10 ms после открытия клапана на 0.4–0.8 s включался 10-ваттный нагреватель, который передавал формователю около 4–8 J тепла. В режиме с экструзией водород при температуре 13 К под давлением газа в трубке над формователем в 3 МПа проникал в ствол в виде тонких пластичных нитей в течение менее 0.5 s. Этот процесс фиксировался видеокамерой. Вслед за этим в течение 3–4 s твердый водород охлаждался в стволе и сформированная макрочастица вновь выстреливалась

импульсом газа из клапана (рис. 3, а). В этом режиме шиберный затвор и клапан подачи водорода оставались всегда открытыми. Процесс формирования и инжекции макрочастицы исключительно прост и обеспечивался клапаном подачи ускоряющего газа и нагревателем. В режиме с плавлением водорода (рис. 3, б) после вытекания газа из ствола в течение 80 ms закрывался шиберный затвор. Твердый водород плавился в порах и жидкость стекала внутрь ствола под действием давления газа 0.1 МПа в трубке над формователем. Часть водорода испарялась, и давление пара внутри ствола вместе с силами поверхностного натяжения удерживало каплю водорода от растекания по стенкам. В течение 1–2 s после плавления водорода и заполнения ствола жидкостью водород замерзал в порах и больше не проникал в ствол. Пористая структура выполняла роль теплового клапана и дозатора жидкого водорода одновременно. Далее в течение 6–8 s водород замерзал в стволе и шиберный затвор открывался. Спустя 0.5 s после этого производился очередной выстрел. Ускоряющий газ и газ, образовавшийся от удара и испарения макрочастицы о фланец диагностической камеры, откачивались насосом и цикл повторялся.

Сигналы с температурного датчика, представленные на рис. 4, позволяли оценивать стабильность режима формирования макрочастиц, а видеозапись давала воз-

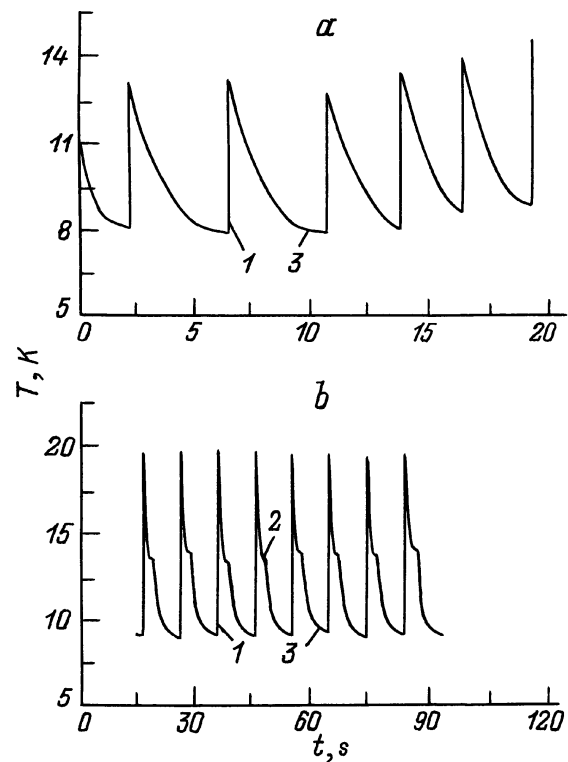


Рис. 4. Зависимость температуры формователя от времени в режимах экструзии (а) и плавления (b): 1 — выстрел и нагрев формователя, 2 — затвердевание водорода, 3 — охлаждение формователя и макрочастицы водорода.

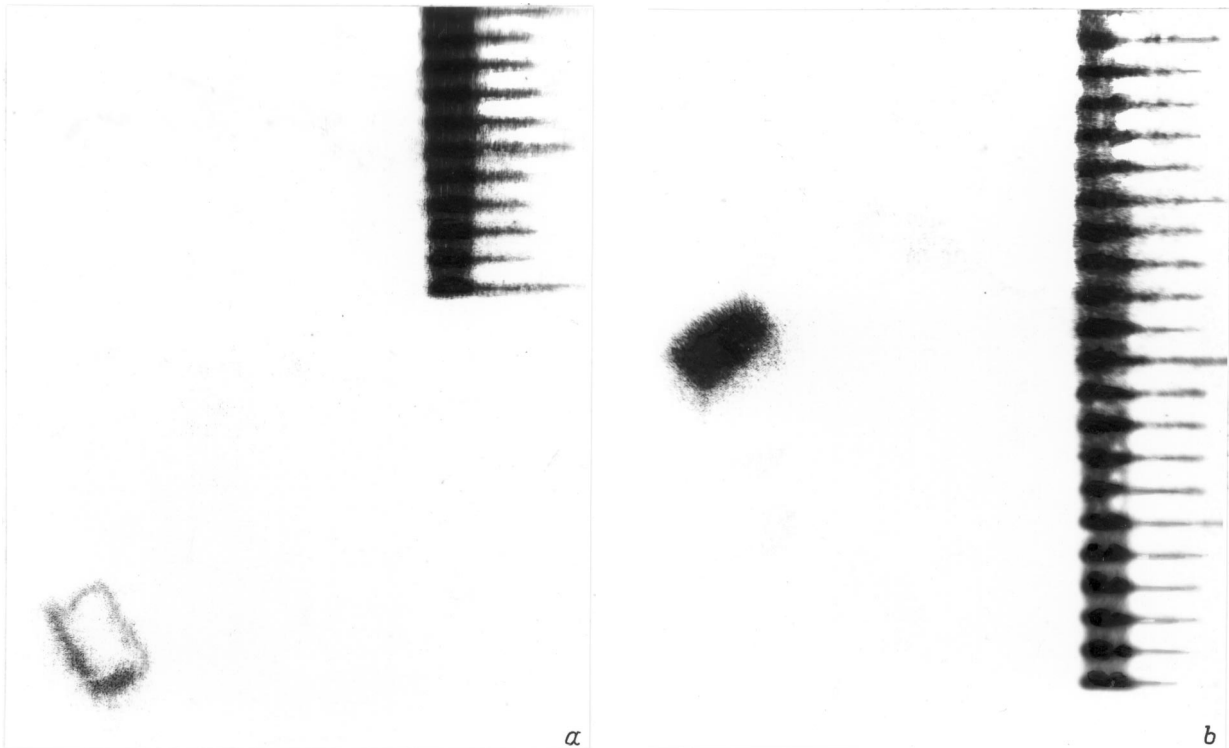


Рис. 5. Макрочастицы сформированные в режимах экструзии (а) и плавления (b) и ускоренных до 1.2 km/s.

Серии водородных макрочастиц, инжектированных из одного ствола, при различных параметрах цикла

Период цикла инжекции, s	Количество частиц в серии, шт.	Давление водорода в формирователе, МПа	Давление ускоряющего газа, МПа	Средняя скорость m/s	Надежность инжекции, %
5	12	3	6	1100	92
6	17	3	6	1200	76
6	25	3	6	1000	88
7	22	3	6	1000	84
5–7	76	3	6	1060	85
8	15	0.1	6	1200	67
9	26	0.1	7	1200	62
9	55	0.1	6	1100	60
8–9	84	0.1	6	1100	62
10	22	0.1	5	700	64
11	26	0.1	6	1000	73
8–12	80	0.1	6	950	64
9–10	138	0.1	6	1050	60
9–14	211	0.1	6	1000	58

можно оценивать их качество, размеры и скорость, а также надежность инжекции. Из рис. 4 видно, что время нагрева формирователя в обоих режимах составляло доли секунды, тогда как время его охлаждения и заморозки макрочастицы в стволе было различным. В режиме с экструзией время охлаждения формирователя до исходной температуры 8 К составляло 5 s при установившейся периодической инжекции и его удалось снизить до 3 s при стрельбе короткими сериями по 3–5 макрочастиц. При стрельбе с интервалом 3 s

более длинными сериями температура формирователя повышалась, как показано на рис. 4, а, и макрочастицы разрушались при ускорении. В режиме с плавлением водорода была зафиксирована задержка в 3–5 s вблизи температуры плавления (около 14 К) при охлаждении формирователя. Это хорошо видно по изгибу кривой на рис. 4, b и связано с фазовым превращением жидкого водорода в твердый. В итоге в этом режиме минимальное время охлаждения формирователя после выстрела до температуры 8 К составляло 8 s. В обоих режимах рас-

ход жидкого гелия сквозь теплообменник формирователя был около 121/h.

Сфотографированные в полете макрочастицы имели различный вид: прозрачный, если они формировались в режиме плавления (рис. 5, *a*), и непрозрачный, если они были сформированы в режиме экструзии (рис. 5, *b*). Поскольку макрочастицы обоих видов ускорялись до 1–1.2 km/s газом под давлением до 6 МПа без разрушения и выбивали при ударе мелкие кусочки из фланца диагностической камеры, то можно предполагать, что они были достаточно прочными, чтобы пролететь сквозь систему дифференциальной откачки к плазме без существенной потери массы. Однако окончательное подтверждение этому даст соответствующий эксперимент.

Свыше тысячи макрочастиц было сформировано и ускорено в инжекторе в течение нескольких серий с небольшими промежутками между сериями. Основные результаты представлены в таблице. Надежность инжекции рассчитывалась как отношение неразрушенных макрочастиц ко всем макрочастицам в серии. Скорости частиц в серии оценивались по месту расположения частицы относительно линейки, размещенной в кадре, и по задержке времени между вспышкой и моментом пролета частицы мимо лазерного луча и детектора. Скорости колебались между 1 и 1.2 km/s при ускорении гелием под давлением 6 МПа. Их диаметр равнялся 2.1–2.4 mm, а длина колебалась от 3 до 4 mm. Уменьшение диаметра макрочастицы по сравнению с внутренним диаметром ствола, равным 2.7 mm, объясняется трением и сублимацией с боковой поверхности во время движения в стволе и хорошо согласуется как с экспериментами на других инжекторах [9], так и с модельными расчетами.

Заключение

Завершен первый этап испытаний десятиствольного инжектора, обеспечивающего периодическую инжекцию макрочастиц термоядерного топлива в стационарном режиме. Пористый формирователь частиц позволил инжектировать твердородные макрочастицы с частотой 0.1–0.2 Hz из одного ствола. В инжекторе в каждый момент времени находились только несколько макрочастиц, что делает его более привлекательным для работы с тритием, чем применение экструдерных инжекторов, содержащих сотни частиц. Кроме того, в инжекторе нет движущихся элементов, кроме клапанов, что повышает его надежность и ремонтпригодность, и позволяет рассматривать в качестве технологической машины для стационарно работающих термоядерных реакторов. После разработки математической модели формирования макрочастиц эксперименты будут продолжены с целью повышения частоты инжекции до 0.5–1 Hz из одного ствола. Затем планируется инжекция макрочастиц из всех 10 стволов для получения максимальной частоты стрельбы.

Автор выражает свою признательность S. Sudo (NIFS, Япония) за поддержку и полезные обсуждения, а также Б.В. Кутееву, А.П. Умову, С.В. Скобликову, П.Ю. Кобленцу и А.Н. Шляхтенко из ТОО "Прикладная физика" за помощь в изготовлении инжектора.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Национального института термоядерных исследований (Япония) и Российского фонда технологического развития.

Список литературы

- [1] Milora S., Houlberg W., Lenguel L., Mertens V. // Nucl. Fusion. 1995. Vol. 35. P. 657–754.
- [2] Kuteev B., Umov A., Viniar I. et al. // Plasma Devices and Operations. 1994. N 2. P. 193–201.
- [3] Combs S. // Rev. Sci. Instr. 1993. Vol. 64. P. 1679–1698.
- [4] Винар И.В., Кутеев Б.В., Скобликов С.В. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. С. 167–175.
- [5] Винар И.В., Скобликов С.В., Кобленц П.Ю. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 20. С. 43–46.
- [6] Combs S., Milora S., Foster C. et al. // Fusion Technology Proc. 14th Symp. Oxford: Pergamon, 1986. Vol. 1. P. 355–360.
- [7] Винар И.В. // А. С. № 1611139. 1997. Т. 15. С. 223.
- [8] Viniar I., Sudo S. // Rev. Sci. Instr. 1997. Vol. 68. P. 1444–1447.
- [9] Milora S. et al. // Nucl. Fusion. 1980. Vol. 20. P. 1491–1497.