

ИНЖЕКТОР ТОПЛИВНЫХ МАКРОЧАСТИЦ ДЛЯ ТОКАМАКА HL-2A

© 2013 г. И. В. Виняр, А. Я. Лукин, С. В. Скобликов, П. В. Резниченко

ПЕЛИН

Россия, 195220, С.-Петербург, ул. Гжатская, 27а

Поступила в редакцию 22.11.2012 г.

После доработки 10.12.2012 г.

Впервые разработан экструдер переменного сечения, в котором используются реологические свойства твердых изотопов водорода для изготовления льда, пригодного для формирования топливных макрочастиц для термоядерных установок. На его основе создан топливный инжектор для ввода в плазму токамака HL-2A (SWIP, Китай) дейтериевых макрочастиц диаметром 1.3 мм и длиной от 1.3 до 1.7 мм со скоростью 100–450 м/с и частотой до 33 Гц.

DOI: 10.7868/S0032816213050108

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнанным способом повышения плотности плазмы термоядерных установок с магнитным удержанием является инжекция твердых топливных макрочастиц, сформированных из изотопов водорода при температурах 6–15 К [1]. При периодической инжекции для формирования твердых макрочастиц с требуемой частотой используются экструдеры, способные изготавливать твердый водород из газа с заданной производительностью [2–4]. Проблема состоит в том, что скорость экструзии твердых изотопов водорода ограничена их свойствами и редко превышает 40 мм/с. Это затрудняет формирование макрочастиц с характерным размером 1.5–2.0 мм и с необходимой для эффективной инжекции топлива частотой выше 10–15 Гц. Неоднократные попытки увеличения скорости экструзии приводили к ее нестабильности [5, 6]. Твердый водород под давлением поршня терял прочность и превращался в шугу, возможно, из-за локального выделения тепла, вызванного деструкцией [6, 7]. Поэтому в инжекторах с поршневыми экструдерами частота инжекции, как правило, не превышает 10 Гц [8].

Для повышения частоты инжекции твердый дейтерий при температуре 13 К заранее экструдируют в дополнительный криостат, температура которого поддерживается на уровне 6 К, с тем чтобы уменьшить сублимацию и увеличить прочность материала [9]. Затем специальным рычагом выдавленный материал быстро перемещают к устройству отрезания макрочастиц. С помощью этого устройства макрочастицы направляются в центробежный ускоритель. Использовать более простой пневматический ускоритель при таком способе формирования макрочастиц практиче-

ски невозможно, так как ускоряющий газ будет нагревать дополнительный криостат.

В данной статье описан новый способ формирования макрочастиц с высокой частотой. Способ заключается в использовании поршневого экструдера переменного сечения и особых свойств твердых изотопов водорода и может найти применение в инжекторах как с центробежными, так и с пневматическими ускорителями.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИЯ ИНЖЕКТОРА

В инжекторе с обычным поршневым экструдером исходный газообразный водород при температуре 10 К превращается в твердый, после чего сжимается и продавливается поршнем сквозь фильеру в виде стержня. Возвратно-поступательным движением тонкостенной трубки поперек стержня из него вырезают кусочки. Сформированные таким способом макрочастицы подаются в ствол, где ускоряются сжатым газом и через систему трубок направляются в плазму.

Экспериментальные данные по экструзии твердого водорода [10] показали, что он ведет себя подобно “бингамовской жидкости” в диапазоне температур 10–13 К [11]. Под давлением 3–10 МПа твердый водород теряет прочность и течет, как вязкая жидкость. Кроме того, при его сжатии выделяется тепло, и вязкость водорода экспоненциально снижается [6, 11]. На этих свойствах водорода основан принцип работы экструдера переменного сечения, схема которого показана на рис. 1.

Внутри экструдера имеются две цилиндрические полости разного диаметра, в которые вставлен поршень, состоящий из двух цилиндров, при-

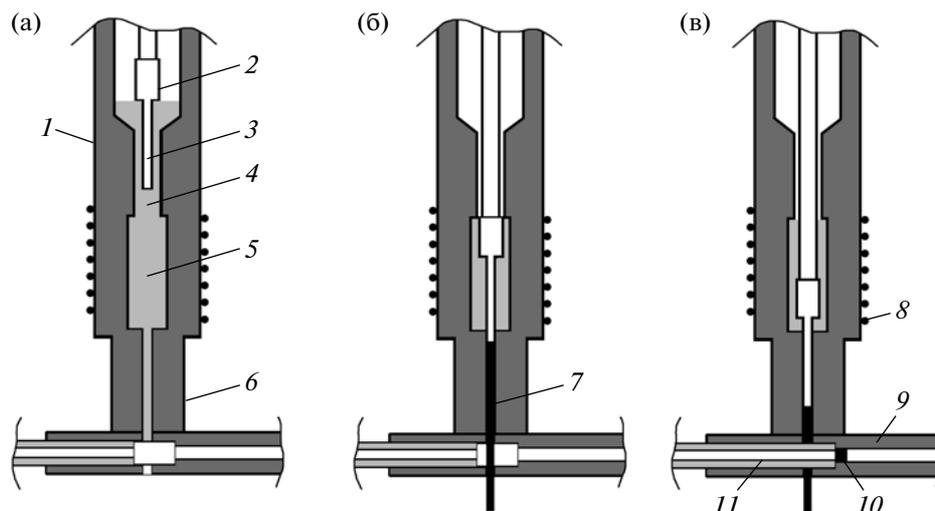


Рис. 1. Схема экструдера переменного сечения: а — заполнение экструдера твердым водородом; б — экструзия твердого водорода в фильеру; в — выталкивание твердого водорода из фильеры, формирование и инжекция макрочастиц. 1 — экструдер; 2 и 3 — верхний и нижний цилиндры поршня; 4 и 5 — верхняя и нижняя полости экструдера; 6 — фильера; 7 — экструдированный стержень; 8 — нагреватель; 9 — ствол; 10 — макрочастица; 11 — трубка отрезателя.

чем диаметр верхнего цилиндра больше диаметра нижнего. Диаметр верхней полости экструдера примерно равен диаметру верхнего цилиндра поршня, а диаметр нижней полости превышает его. На выходе экструдера расположена фильера, которая длиннее нижнего цилиндра поршня. Канал внутри фильеры может быть как круглого, так и прямоугольного сечения, но нижний цилиндр поршня должен свободно проходить сквозь фильеру.

При выдвинутом вверх поршне газообразный водород замерзает внутри экструдера (рис. 1а). При медленном движении поршня вниз фильера заполняется экструдированным твердым водородом. Размеры экструдера подбираются таким образом, чтобы при опускании верхнего цилиндра поршня в нижнюю полость экструдера заполнилась вся фильера, а нижний цилиндр поршня вошел внутрь фильеры, как показано на рис. 1б. Длина фильеры определяет количество макрочастиц, которые могут быть сформированы в цикле. За время ожидания инжекции водород с поверхности стержня сублимирует, и охлажденный за счет сублимации водорода стержень может свободно перемещаться относительно стенок фильеры.

С началом цикла инжекции поршень быстро выдвигает из фильеры уже экструдированный стержень, так как канал фильеры имеет постоянное сечение и не создает препятствий движению стержня. Напротив, водород под верхним цилиндром поршня сильно сдавливается, поскольку канал фильеры закрыт нижним цилиндром поршня, и превращается в вязкую бингамовскую жидкость, что позволяет быстро и без особого сопротивления перемещать поршень вниз. Этому способствует также импульсный нагрев нижней

полости экструдера непосредственно перед циклом инжекции. Вязкая жидкость при этом вытекает из под верхнего цилиндра поршня вдоль его боковой поверхности, как это наблюдалось в [7].

Макрочастицы изготавливаются из выдвигаемого из фильеры стержня так же, как в обычном поршневом экструдере (рис. 1в), однако частота их формирования уже не зависит от скорости экструзии льда, а определяется скоростью движения поршня. При этом чем выше скорость поршня, тем сильнее сдавливается водород под верхней частью поршня, тем больше снижается прочность твердого водорода и меньше его сопротивление движению поршня.

Схема конструкции инжектора приведена на рис. 2. Для охлаждения экструдера используют криорефрижератор замкнутого цикла (на рис. 2 не показан), который установлен внутри вакуумной камеры криостата перпендикулярно плоскости рисунка. К 1-й ступени криорефрижератора прикреплен теплоизолирующий экран, внутри которого размещен экструдер, присоединенный ко 2-й ступени рефрижератора. Экструдер соединен с трубкой, закрепленной в верхнем фланце вакуумной камеры. Внутри экструдера вставлен поршень, верхняя часть которого представляет собой цилиндр $\varnothing 4$ мм и длиной 8 мм, а нижняя — цилиндрический шток $\varnothing 1.3$ мм и длиной 90 мм. Диаметры верхней и нижней полостей экструдера соответственно равны 4 и 8 мм. Поршень прикреплен к валу линейного привода, установленному на верхнем фланце вакуумной камеры и способному перемещать поршень вверх/вниз на расстояние 132 мм с регулируемой скоростью от 2 до 100 мм/с. Снизу экструдер соединен с филье-

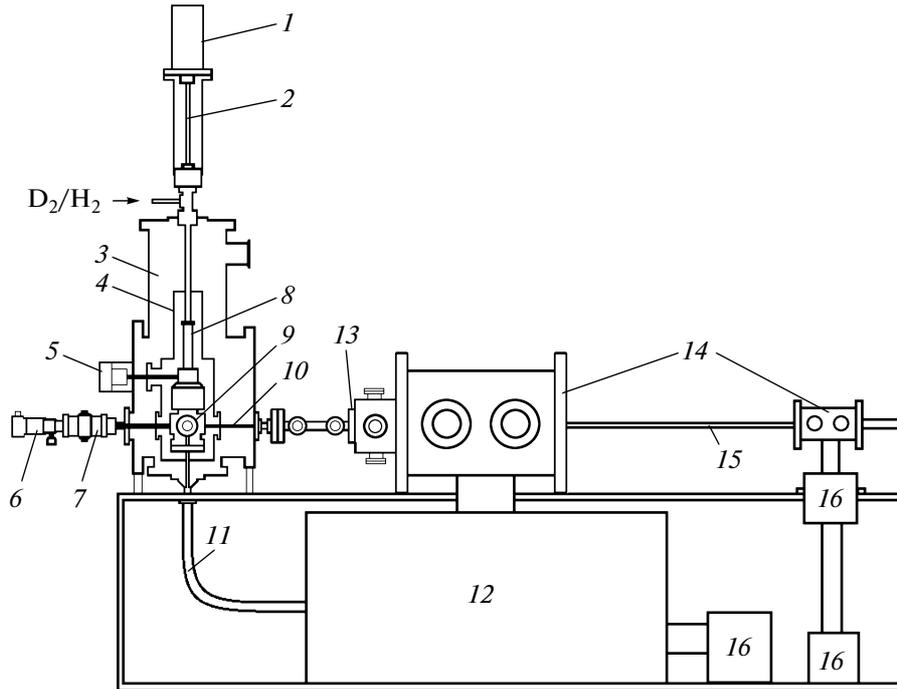


Рис. 2. Схема конструкции инжектора для токамака HL-2A. 1 – линейный привод; 2 – вал привода; 3 – вакуумная камера криостата; 4 – экран; 5 – регулятор длины макрочастиц; 6 – стреляющий клапан; 7 – отрезатель макрочастиц; 8 – экструдер; 9 – визуальная камера; 10 – ствол; 11 – трубопровод откачки визуальной камеры; 12 – танк; 13 – диагностическая камера; 14 – камеры системы дифференциальной откачки; 15 – направляющая трубка; 16 – вакуумные насосы.

рой длиной 92 мм, имеющей канал прямоугольного сечения $1.4 \times 2.0 \text{ мм}^2$. В месте крепления фильеры к экструдеру в нее вставлен клин регулятора длины макрочастиц. Клин можно перемещать поперек канала фильеры вдоль его длинной стороны так, что ширина канала всегда остается 1.4 мм, а его длина меняется от 1.3 до 1.7 мм. Перемещение клина осуществляется шаговым двигателем, закрепленным на боковом фланце вакуумной каме-

ры, и контролируется с точностью 0.05 мм с помощью датчика положения.

К концу фильеры прикреплена камера с прозрачными окнами для наблюдения за процессом экструзии. Внутри камеры вблизи фильеры в горизонтальной плоскости размещены части отрезателя макрочастиц и начало ствола, как показано на рис. 3. Трубку отрезателя калибром 1.3 мм и с толщиной стенки 0.1 мм электромагнитным приводом можно перемещать вперед/назад вдоль оси ствола с частотой до 40 Гц на расстояние 10 мм. Привод содержит две независимо запитываемые катушки с якорями, припаянными к одной трубке отрезателя макрочастиц. К приводу присоединен стреляющий клапан для подачи ускоряющего газа в трубку отрезателя макрочастиц и, далее, в ствол, конец которого вставлен в диагностическую камеру. В последней на расстоянии 80 мм друг от друга расположены три пары окон. Через первые две пары окон с помощью расположенных напротив друг друга фото- и светодетекторов фиксируются моменты пересечения макрочастицами световых барьеров. Через третью пару окон макрочастицы фотографируются в полете, причем в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях, как в инжекторе для токамака TORE-SUPRA [3].

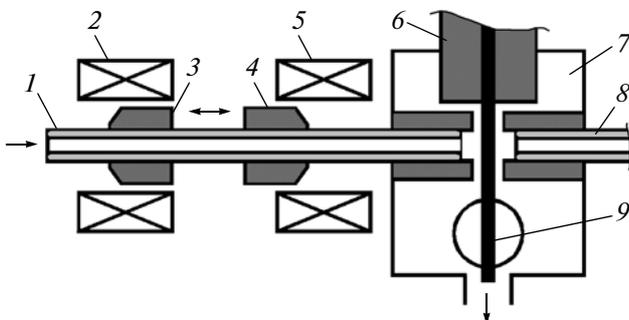


Рис. 3. Схема отрезателя макрочастиц. 1 – трубка отрезателя; 2 – катушка обратного хода; 3 и 4 – якоря обратного и прямого хода; 5 – катушка прямого хода; 6 – фильера; 7 – камера визуального контроля; 8 – ствол; 9 – стержень твердого водорода.



Рис. 4. Основное программное окно системы управления работой инжектора.

Диагностическая камера подключена к системе дифференциальной откачки, состоящей из двух вакуумных камер с размещенной внутри них направляющей трубкой калибром 6 мм и длиной 1.5 м. Первая камера подключена к танку объемом 450 л для сброса основного количества ускоряющего газа. В него выведен также трубопровод откачки визуальной камеры экструдера для удаления пара от сублимирующего водорода, оставшегося после формирования макрочастиц. Вторая камера объемом 20 л защищает камеру токамака от потока газа из инжектора во время подготовки к циклу инжекции. Газовая система аналогична той, что использовалась в других инжекторах [2, 3].

При работе инжектора для управления процессами нижнего уровня, требующими быстрой реакции, используется программируемый логический контроллер (п.л.к.). Он обеспечивает стабилизацию температуры и давления, выполнение программы инжекции. Управление верхнего уровня осуществляется персональным компьютером (п.к.), соединенным с п.л.к. через последовательный интерфейс. Персональный компьютер дополнительно оснащен платами видеозахвата и быстродействующих счетчиков, которые используются про-

граммами фоторегистрации и измерения скорости макрочастиц. Управляющая программа компьютера отображает в основном окне (рис. 4) информацию с датчиков температуры и давления, состояние клапанов газовой системы (открыт/закрыт), положение линейного привода и уровень мощности нагревателей. Оператор задает в программном окне параметры, определяющие количество, скорость и частоту инжекции макрочастиц.

Для надежного заполнения экструдера и выдавливания стержня требуется многошаговая процедура с дозированной подачей топливного газа, с изменением распределения температуры и скорости поршня. Для обеспечения гибкости в выборе режимов работы был разработан специальный язык (набор из 20 команд с параметрами), позволяющий программировать последовательность действий. В процессе работы управляющая программа загружает в п.к. текстовый файл с заданной последовательностью и реализует ее, передавая необходимые команды п.л.к. Так как типичная последовательность содержит десятки шагов с подбираемыми параметрами, такой подход позволил обеспечить гибкость и простоту настройки системы управления.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЖЕКТОРА

Перед охлаждением линии подачи газов продуваются, и все вакуумные камеры инжектора откачиваются до уровня не хуже 10^{-3} Па. Оператор выбирает в программном окне изотоп водорода (протий или дейтерий), из которого будут изготавливаться макрочастицы. Для охлаждения используется криорефрижератор мощностью 1.5 Вт при температуре 4.2 К, что позволяет охлаждать экструдер до 10 К за 2.5 ч. Минимальная температура экструдера 5.5 К достигается спустя 5 ч после начала охлаждения. После охлаждения до 8–9 К инжектор переходит в состояние “Ожидание (пустой)”.

Перед началом цикла инъекции в программном окне инжектора (рис. 4) оператор устанавливает следующие параметры: количество макрочастиц, которые будут инжектированы в цикле (от 1 до 30), период их инъекции (30–1000 мс), время разгона поршня до заданной скорости (100–200 мс) и время задержки начала инъекции первой макрочастицы по отношению к импульсу запуска плазмы, поступающему от системы управления токамаком (0–1000 мс). Скорость движения поршня в режиме экструзии составляет 2 мм/с, а в режиме инъекции определяется, исходя из установленных оператором периода инъекции и длины стержня, расходуемого на изготовление одной макрочастицы. Например, если в цикле предполагается инжектировать макрочастицы с периодом 50 мс (частота 20 Гц) и оператор установил в программном окне значение 3 мм на одну макрочастицу, то поршень будет двигаться со скоростью 60 мм/с. Поскольку длина выдвигаемого стержня в экспериментах составляла ~ 75 мм, то при установленных параметрах можно инжектировать до 25 макрочастиц. Кроме того, оператор задает давление ускоряющего газа и положение регулятора длины макрочастиц. Скорость перемещения отрезателя и количество ускоряющего газа, поступающего из стреляющего клапана, также можно регулировать путем изменения напряжений, которые определяют токи через их катушки. Типичные значения напряжения на клапане и отрезателе показаны на рис. 4.

За 5–6 мин до начала инъекции оператор начинает напуск, например, дейтерия чистотой не хуже 99.95%. После завершения процедуры заполнения экструдера инжектор автоматически переходит в режим “Ожидание (полный)”. За 30 с до инъекции оператор переводит инжектор в состояние “Экструзия”. Поршень перемещается вниз со скоростью 2 мм/с на расстояние 49 мм и входит в канал фильеры, из которого выдвигается прозрачный твердый стержень, как показано на рис. 5. После окончания экструзии инжектор автоматически переходит в состояние “Готовность к инъек-

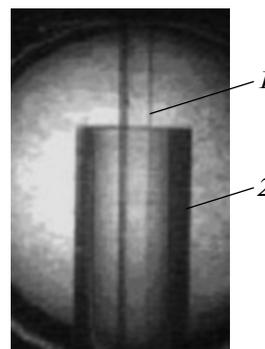


Рис. 5. Фотография стержня из экструдированного твердого дейтерия. 1 – стержень толщиной 1.7 мм, 2 – приемная втулка трубопровода откачки.

ции”, ожидая сигнал от системы управления токамаком.

В момент прихода импульса запуска инъекции линейный привод перемещает поршень вниз, плавно увеличивая его скорость за установленное оператором время 100–200 мс. Это позволяет избежать резкой нагрузки поршня на стержень. Одновременно с импульсом запуска включается нагреватель, и температура экструдера начинает повышаться. Стержень выталкивается вертикально вниз в канал между стволом и трубкой отрезателя макрочастиц со скоростью, заданной оператором. При этом канал фильеры ориентирован так, что трубка вырезает поперек стержня макрочастицу требуемой длины. Отрезатель перемещает трубку вперед/назад с заданной частотой, а клапан с задержкой 1–2 мс относительно сигнала на перемещение трубки вперед обеспечивает подачу в нее ускоряющего газа.

За время перемещения трубки отрезателя назад макрочастица ускоряется в стволе, и газ откачивается, в том числе из камеры визуального контроля. При полете в диагностической камере после пересечения макрочастицей первого светового барьера начинается прямой отсчет времени. При пересечении макрочастицей второго светового барьера фиксируется время ее пролета и начинается обратный отсчет времени. Поскольку скорость макрочастицы практически постоянна, то к моменту ее прилета к третьей паре окон счетчик времени обнуляется, и контроллер выдает сигнал на запуск вспышки. Сигнал вспышки длительностью ~ 200 нс подсвечивает макрочастицу, изображение которой фиксируется на матрице постоянно включенной видеокамеры. На фото (рис. 6) может быть выведена информация о скорости v , м/с, макрочастицы, рассчитанной по времени ее пролета расстояния между барьерами, и о приблизительном объеме V , мм³, вычисленном по двум проекциям макрочастицы.

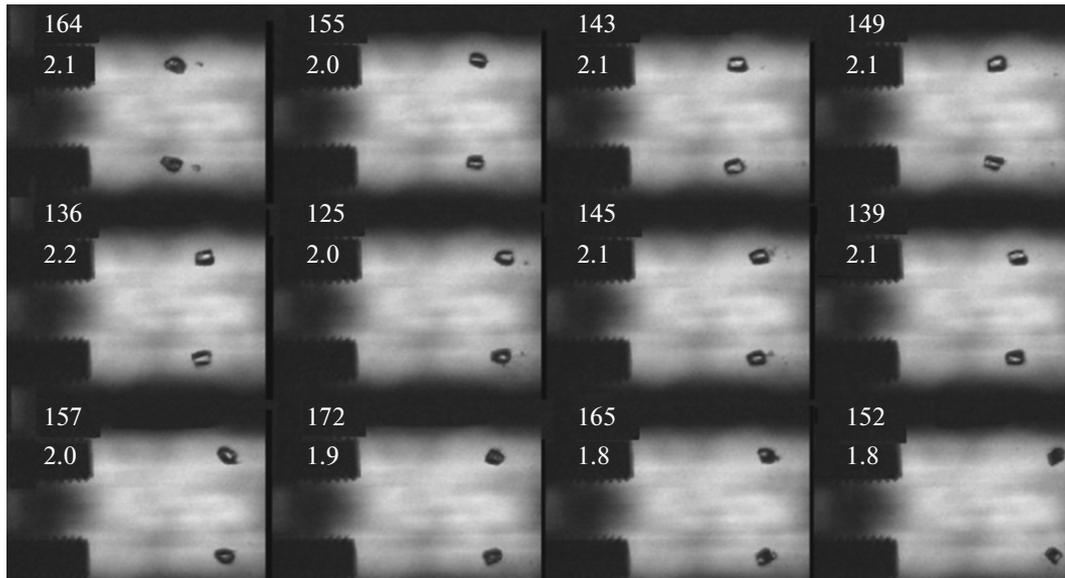


Рис. 6. Фотографии инжектированных дейтериевых макрочастиц (в двух проекциях); для каждого кадра указаны скорость v , м/с, (верхняя цифра) и объем V , мм³, (нижняя цифра).

Типичные параметры инжектора при стрельбе дейтериевыми макрочастицами приведены в таблице. Диаметр всех макрочастиц составлял 1.3 мм, разброс скоростей в одном цикле инъекции — $\pm 20\%$. Надежность инъекции рассчитывалась как отношение зарегистрированных на фотографиях макрочастиц к числу произведенных выстрелов. Видно, что в широком диапазоне частот, скоростей и размеров макрочастиц инжектор обеспечивает высокую надежность инъекции. Вместе с тем, с увеличением частоты инъекции или скорости макрочастиц возрастала тепловая нагрузка на фильеру экструдера со стороны ускоряющего газа, который не успевали откачивать из ствола и визуальной камеры. В результате длину стержня, необходимую для формирования одной макрочастицы, а следовательно, и скорость выталкивания стержня приходилось увеличивать, что приводило к уменьшению общего числа макрочастиц, инжектированных в цикле. Если при частоте 1–10 Гц удавалось инжектировать до 33 макрочастиц, то при частоте инъекции 20–30 Гц из инжектора с высокой надежностью вылетало 10–15 макрочастиц. Максимальная частота инъекции была ограничена электронным блоком питания стреляющего клапана и составила 33 Гц. При этой частоте надежно инжектировалось только 13 макрочастиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в статье инжектор успешно используется на токамаке HL-2A с 2009 г. Применение экструдера переменного сечения позволило увеличить частоту инъекции макрочастиц до 33 Гц, что было недостижимо в инжекторах с пневмати-

ческими ускорителями. В экспериментах в плазму инжектировались макрочастицы сериями по 3–5 штук с частотой 10–20 Гц и скоростями 200–300 м/с с надежностью, превышающей 90%. Применение криорефрижератора замкнутого цикла существенно упростило эксплуатацию инжектора, что дало возможность использовать для его

Параметры инъекции дейтериевых макрочастиц

Частота инъекции, Гц	Длина макрочастиц, мм	Скорость, м/с	Количество макрочастиц в серии, шт.	Надежность инъекции
1	1.3	170	25	100
	1.7	450	9	100
5	1.3	130	33	97
	1.7	450	16	100
10	1.3	150	30	94
	1.7	400	9	100
15	1.3	120	17	100
	1.7	345	20	95
20	1.3	180	10	100
	1.7	350	10	100
30	1.3	320	10	100
	1.7	320	10	100
33	1.3	150	13	81

обслуживания персонал без специальной подготовки.

Авторы благодарят сотрудников Юго-Западного института физики D. Q. Liu, G. L. Zhu, H. B. Xu за помощь в установке и эксплуатации инжектора на токамаке HL-2A.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Milora S., Houlberg W., Lengyel L., Mertens V.* // Nucl. Fusion. 1995. V. 35. № 6. P. 657.
2. *Виняр И.В., Лукин А.Я., Умов А.П. и др.* // ПТЭ. 2006. № 5. С. 148.
3. *Виняр И.В., Умов А.П., Лукин А.Я. и др.* // ПТЭ. 2006. № 4. С. 143.
4. *Виняр И.В., Лукин А.Я., Скобликов С.В. и др.* // ПТЭ. 2006. № 5. С. 142.
5. *Foster C.* // J. Vac. Sci. Technol. 1983. V. A 1 (2). P. 952.
6. *Towle L.* // J. Phys. Chem. Solids. 1965. V. 26. P. 659.
7. *Stewart J.* // Physical Review. 1955. V. 97. № 3. P. 578.
8. *Combs S., Foust C., Milora S.* // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. № 3. P. 2736.
9. *Andelfinger C., Buchelt E., Cierpka P. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 1993. V. 64. № 4. P. 983.
10. *Виняр И.В., Кутеев Б.В., Скобликов С.В. и др.* // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 167.
11. *Виняр И.В., Лукин А.Я.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 1. С. 107.