

04;12

## Инжектор водородных макрочастиц со шнековым экструдером

© И.В. Виняр, С.В. Скобликов, П.Ю. Кобленц

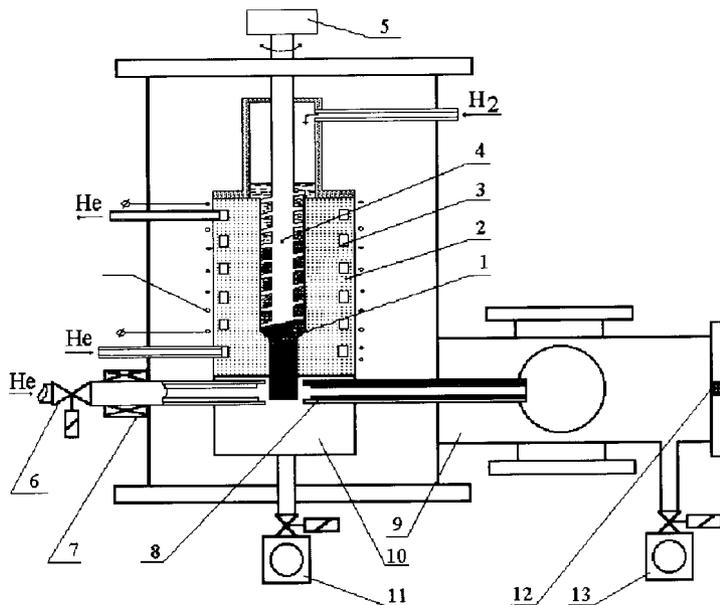
С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 14 мая 1997 г.

Впервые создан инжектор, способный вбрасывать в плазму термоядерных установок неограниченное количество топливных макрочастиц в непрерывном и длительном режиме. Свыше тысячи частиц с размером 2 мм были сформированы без перерыва из шнекового экструдера с частотой 1 и 2 Hz и ускорены до 0.8 km/s.

Поддержание реакции синтеза в термоядерных установках осуществляется топливными инжекторами, которые вбрасывают в плазму макрочастицы твердых изотопов водорода с частотой от 1 до 40 Hz [1,2]. Непрерывная работа этих инжекторов длится лишь несколько секунд, поскольку ограничена запасом твердого водорода, предварительно замороженного в экструдере инжектора. Применение двух и более экструдеров для непрерывной инъекции, так же как увеличение запаса топлива в экструдере, нежелательно по условиям безопасности, особенно при работе с тритием.

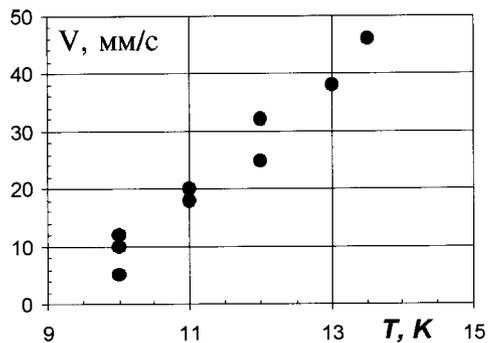
В основе впервые созданного инжектора, способного обеспечить длительное и непрерывное формирование и ускорение топливных макрочастиц, лежит хорошо известный шнековый экструдер пластических масс [3]. В экструдер топливного инжектора, имеющего температуру около 10 K, подается газ, который, по мере продвижения вдоль шнека, превращается сначала в жидкость, а затем в лед. Это осуществимо, поскольку температурный интервал между жидким и твердым пластичным состоянием изотопов водорода составляет всего 5–10 K. Однако возможность сдавливания в стабильном режиме твердого водорода шнеком до 5–20 МПа, необходимых для экструзии [1,2,4], требовала экспериментальной проверки. Для этого был создан инжектор, схема которого приведена на рис. 1. Его основными частями являются высоковакуумная камера 1, внутри которой расположен экструдер 2 с проточным теплообменником 3 и шнеком 4, соединенным вне камеры



**Рис. 1.** Схема инжектора топливных макрочастиц со шнековым экструдером.

с мотором 5, клапан 6 подачи ускоряющего газа, электромагнитный привод 7 подачи макрочастицы в ствол 8 и диагностическая камера 9. К выходному отверстию экструдера присоединена прозрачная камера 10, снабженная вакуумным насосом 11, имеющая линейную шкалу для визуального наблюдения и измерения длины твердородного стержня. Экструдер длиной 150 mm представляет собой цилиндрическую камеру с внутренним диаметром 12 mm на внешней поверхности которой нарезан винтовой канал теплообменника. В верхней и нижней частях экструдера размещены два полупроводниковых датчика температуры. Вдоль экструдера намотан нагреватель мощностью 30 W.

На первом этапе экспериментов основное внимание было сосредоточено на получении стабильного режима экструзии. Температура экструдера поддерживалась постоянной в диапазоне 10–13 K путем регулирования потока гелия и мощности нагревателя. Перед началом экструзии водород при давлении менее 0.1 МПа напускался в экструдер



**Рис. 2.** Зависимость скорости экструзии  $V$  от температуры водородного стержня  $T$  при скорости вращения шнека 15 г/мин.

и замерзал в нем. Шнек вращался как мотором, так и вручную со скоростью 10–80 г/мин. Спустя 2–10 с после начала вращения шнека твердородный стержень появлялся внутри визуальной камеры, где производились его фото- и видеосъемка. Прозрачный вид свидетельствовал о хорошем качестве твердородного стержня.

Скорость экструзии рассчитывалась по времени прохождения конца стержня вдоль шкалы длиной 6 см с пятимиллиметровыми делениями, прикрепленной к стенке визуальной камеры. Наиболее устойчиво поддерживался режим экструзии при вращении шнека со скоростью 15 г/мин. В этом режиме зависимость скорости экструзии от температуры водородного стержня приведена на рис. 2. Экструзия водорода со скоростью около 20 мм/с при температуре 11 К шла непрерывно более 30 мин, пока твердый водород не заполнил объем визуальной камеры. После ее вакуумирования экструзия немедленно возобновилась с началом вращения шнека. За все время экструзии выдавился стержень водорода длиной более 50 м, из которого можно было бы приготовить с учетом отходов на отрезание более 12 000 макрочастиц с характерным размером 2 мм. При этом в каждый момент времени внутри экструдера находилось не более 5 см<sup>3</sup> твердого водорода. Это свидетельствует о высокой эффективности и привлекательности такого инжектора для подпитки реактора топливом, поскольку масса трития в инжекторе составила бы менее 2 г.

Целью второго этапа являлась демонстрация возможности формирования и ускорения макрочастиц без разрушения в непрерывном частотном режиме, а также их фотографирование. После появления стержня в визуальной камере электромагнитный привод быстро перемещал тонкостенную трубку к стержню и, отрезая таким образом часть стержня, переносил сформированную макрочастицу внутрь ствола диаметром 2.4 mm. Вслед за этим сжатый гелий под давлением 2–4 МПа поступал из импульсного клапана и ускорял макрочастицу в стволе. Спустя 0.05 s после выстрела привод возвращал трубку в исходное положение и стержень водорода продолжал выдавливаться в визуальную камеру без видимой задержки или потери качества льда. Тем самым удалось подтвердить, что толкающий газ практически не влияет на стабильность и скорость экструзии. В первых экспериментах стрельба производилась с частотой 1 и 2 Hz. Более тысячи макрочастиц было сформировано и ускорено до 0.6–0.8 km/s без перерыва. Все сфотографированные частицы были без видимых на фотографиях следов разрушения. В настоящее время ведется подготовка экспериментов по инъекции частиц с частотой до 10 Hz из смеси дейтерия с водородом.

Предложенный и экспериментально проверенный способ формирования топливных макрочастиц с использованием шнекового экструдера позволяет принципиально решить проблему создания надежной системы для подпитки топливом плазмы термоядерных реакторов в непрерывном и длительном режиме. Один экструдер такого типа удовлетворяет всем современным требованиям к системе инъекции топлива в реакторы типа ИТЭР в части, касающейся формирования макрочастиц, и отличается исключительной простотой и надежностью, а также небольшим запасом изотопов водорода внутри инжектора. Можно ожидать увеличения скорости экструзии после окончания проводящихся в настоящее время математического моделирования и экспериментов.

## Список литературы

- [1] Milora S.L., Houlberg W.A., Lenguel L.L., Mertens V. // Nucl. Fusion. 1995. V. 35. P. 657.
- [2] Combs S.K. // Rev. Sci. Instr. 1993. V. 64. P. 1679.
- [3] Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1965.
- [4] Виняр И.В., Кутеев Б.В., Скобликов С.В. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. С. 167.