

04;12

## Частотный инжектор водородных макрочастиц со шнековым экструдером

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

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

(Поступило в Редакцию 30 апреля 1997 г.)

Описан новый инжектор для непрерывного формирования и ввода в плазму термоядерных реакторов неограниченного количества топливных макрочастиц. Твердодородный стержень длиной более 50 м был экструдирован со средней скоростью 20 мм/с и более тысячи частиц размером 2 мм были сформированы из него в непрерывном режиме с частотой 1 и 2 Hz и ускорены до 0.6–0.8 км/с.

### Введение

Одним из способов ввода топлива в плазму термоядерного реактора является инжекция макрочастиц из отвержденных изотопов водорода. Крупные термоядерные установки оснащены инжекторами, которые непрерывно вбрасывают топливные макрочастицы в плазму с частотой от 1 до 40 Hz [1,2]. Однако время непрерывной работы инжектора ограничено объемом предварительно замороженного в нем топлива, из которого формируются макрочастицы, и составляет всего несколько минут после чего требуется пауза для замораживания новой порции топлива. Увеличение объема экструдера не решает проблему, поскольку масса трития в инжекторе должна быть минимальной. Непрерывную и длительную инжекцию макрочастиц предполагалось обеспечить за счет применения в инжекторе поочередно работающих двух и более экструдеров для формирования макрочастиц [2,3]. Это привело к усложнению конструкции и увеличению количества топлива внутри инжектора, что неприемлемо при работе с тритием. Более простой и многообещающий способ непрерывной "газовой" экструзии термоядерного топлива [4] несет повышенную опасность из-за высокого давления газообразных (и взрывоопасных) изотопов водорода, применяемых в технологическом цикле. В работе описывается способ экструзии твердого водорода с применением одного шнекового экструдера и конструкция инжектора, который позволяет решить проблему непрерывного, длительного и надежного формирования топливных макрочастиц для инжекции в реактор.

### Описание способа экструзии и конструкция инжектора

В основе предлагаемого способа непрерывной экструзии лежит хорошо известный способ шнековой экструзии пластических масс [5], в котором шнек при вращении подает твердые частицы рабочего тела (пластмассы, эластомеров и пр.) к выходному отверстию и за счет создаваемой компрессии и нагревания материал выдавливается сквозь отверстие. В отличие от этого в экструдер то-

пливного инжектора, имеющего температуру около 10 К, 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 К. Известно, что для экструзии прозрачного твердодородного льда, пригодного для формирования прочной макрочастицы, требуется его сдавливать до 5–20 МПа [1–4], что приводит к значительному тепловыделению и может вызвать расплавление и нестабильность экструзии. Поэтому возможность получения устойчивого режима экструзии за счет вращения шнека требует экспериментальной проверки. Для этого был создан инжектор, схема и общий вид которого приведены 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 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 твердодородного стержня. Основная система вакуумирования инжектора на рис. 1 не показана. Экструдер длиной 150 мм представляет собой цилиндрическую камеру с внутренним диаметром 12 мм, 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. Между экструдером и стволом имеется зазор, который служит для тепловой изоляции экструдера от ствола, не охлаждаемого потоком гелия.

Во время работы инжектора водород непрерывно подается в экструдер, который охлаждается потоком гелия из сосуда Дьюара. Поток гелия регулируется системой стабилизации давления пара внутри Дьюара, а также регулятором потока на выходе из камеры инжектора, которые на рис. 1 не показаны. Под действием мотора шнек вращается внутри камеры экструдера и водород, перемещаясь вдоль винтового канала шнека, постепенно

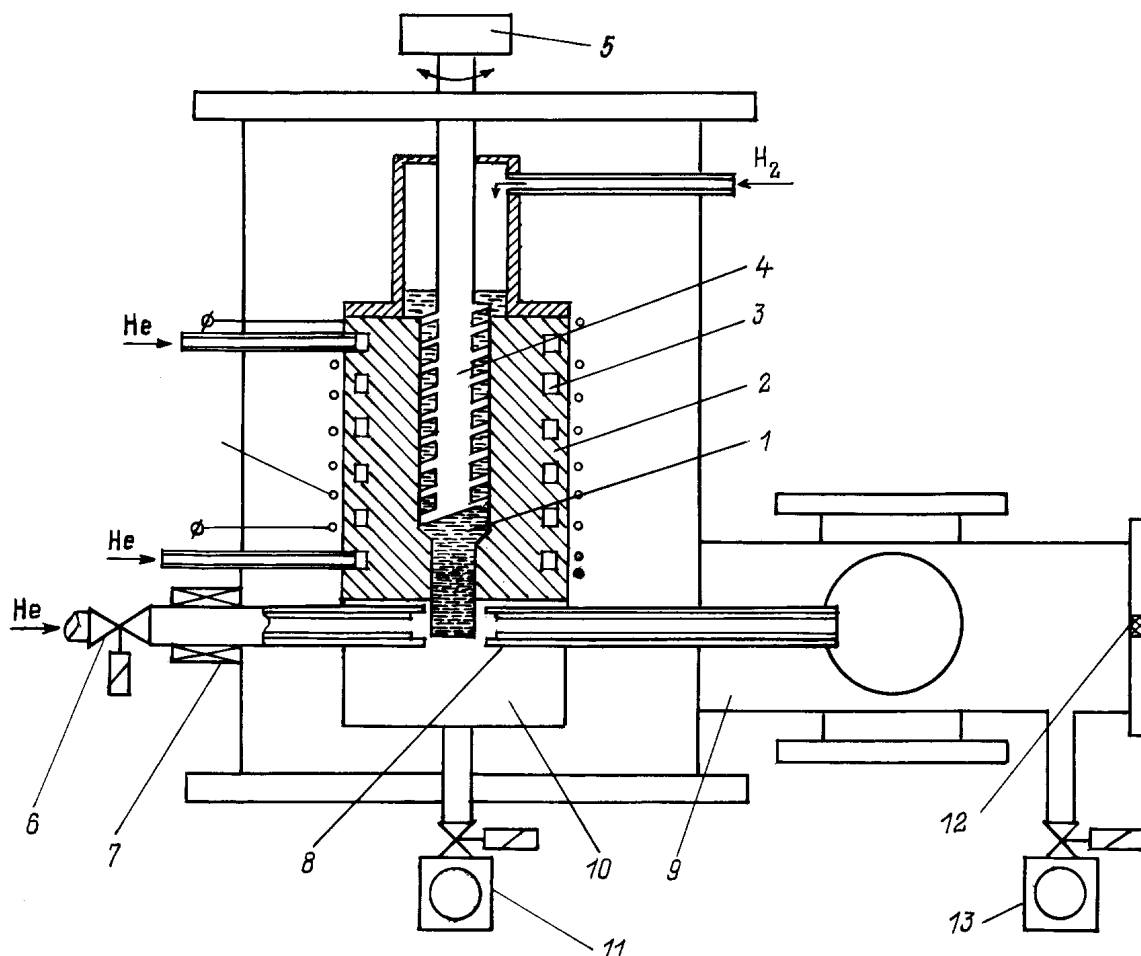


Рис. 1. Схема инжектора топливных макрочастиц с винтовым экструдером.

замерзает и выдавливается через отверстие диаметром 2 мм в камеру для визуального наблюдения. Электромагнитный привод перемещает тонкостенную трубку, которая отрезает часть экструдированного стержня и входит внутрь ствола. Спустя короткое время после этого (0.05–0.1 с) клапан подает сжатый газ, который ускоряет макрочастицу в стволе и выбрасывает ее в диагностическую камеру. Частица пересекает световой барьер и ударяется в микрофон 12, прикрепленный к фланцу камеры. По этим сигналам измеряется ее скорость и частица фотографируется при подсветке импульсной лампой с длительностью вспышки 0.1  $\mu$ s. После удара в микрофон частица испаряется и вместе с ускоряющим газом удаляется из камеры вакуумным насосом 13. Цикл повторяется.

## Экспериментальные результаты

На первом этапе основное внимание было сосредоточено на получении стабильного режима экструзии. Температура экструдера поддерживалась постоянной в диапазоне 10–13 К путем регулирования потока гелия

(до 10 л/ч) и мощности нагревателя. Колебания температуры от установленного значения не превышали 0.5 К. Перед началом экструзии водород при давлении менее 0.1 МПа напускался в экструдер и замерзал в нем. Шнек вращался как мотором, так и вручную со скоростью 10–80 rpm. Спустя 2–10 с после начала вращения шнека твердородный стержень появлялся внутри визуальной камеры. Его характерный вид представлен на рис. 2 при различных температурах экструдера. Видно, что чем выше температура стержня, тем сильнее он изгибается. В случае остановки экструзии цилиндрический стержень за 5–10 с приобретает коническую форму за счет сублимации водорода в вакуум. Прозрачный вид свидетельствует о хорошем качестве твердородного стержня.

Скорость экструзии рассчитывалась по времени прохождения конца стержня вдоль шкалы длиной 6 см с пяти миллиметровыми делениями, прикрепленной к стенке визуальной камеры. Наиболее устойчиво поддерживался режим экструзии при вращении шнека со скоростью 15 rpm. В этом режиме зависимость скорости экструзии от температуры водородного стержня приведена на рис. 3. При увеличении скорости вращения шнека свыше

30 грм скорость экструзии практически не увеличивалась и даже уменьшалась со временем вплоть до нуля, что, по-видимому, связано с сильным разогревом водорода внутри камеры экструдера и снижением создаваемого давления компрессии. Тем не менее приемлемая скорость экструзии 2–4 см/с для формирования макрочастиц при температуре 10–12 К с частотой до 10 Hz непрерывно поддерживалась более 30 min, пока твердый водород не заполнил объем визуальной камеры. После ее вакуумирования экструзия немедленно возобновилась с началом вращения шнека. За все это время выдавился стержень водорода длиной более 50 m, из которого можно было бы приготовить с учетом отходов на отрезание более 12 000 макрочастиц с характерным размером 2 mm. При этом в каждый момент времени внутри экструдера находилось не более 5 см<sup>3</sup> твердого водорода, что составляло менее 800 макрочастиц. Это свидетельствует о высокой эффективности и привлекательности такого инжектора для подпитки реактора топливом, поскольку масса трития в инжекторе составила бы менее 2 g.

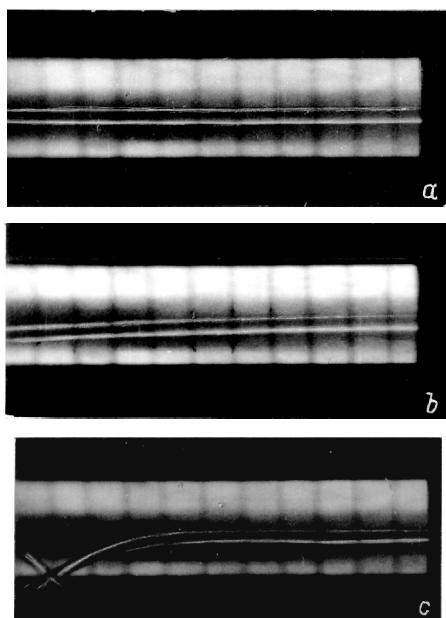


Рис. 2. Твердодородные стержни, экструдированные при температурах 10 (a), 11 (b), 12 К (c).

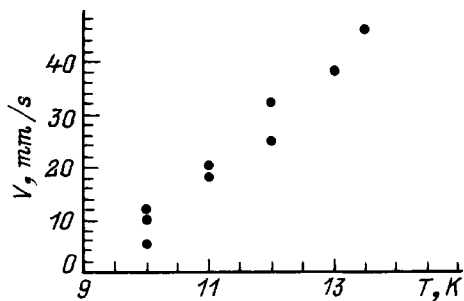


Рис. 3. Зависимость скорости экструзии V от температуры водородного стержня T при скорости вращения шнека 15 грм.

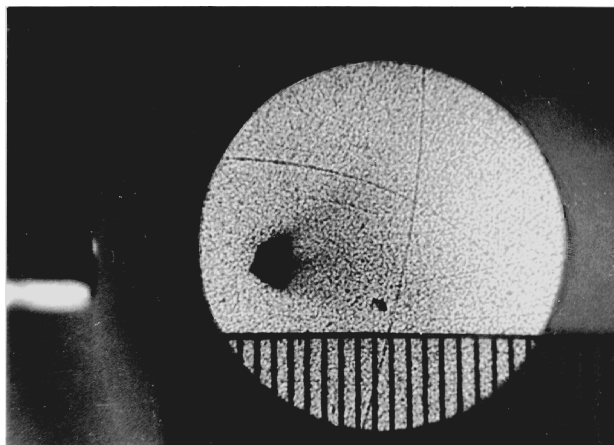


Рис. 4. Серия водородных макрочастиц, инжектированных с частотой 1 Hz со скоростью 0.7 km/s.

Целью второго этапа являлась демонстрация возможности формирования и ускорения макрочастицы без разрушения в непрерывном частотном режиме, а также ее фотографирование. После появления стержня в визуальной камере электромагнитный привод быстро перемещал к нему тонкостенную трубку 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 потери качества льда или задержки. Тем самым удалось подтвердить, что толкающий газ практически не влияет на стабильность и скорость экструзии. В первых экспериментах стрельба производилась с частотой 1, 1.5 и 2 Hz. Более тысячи макрочастиц было сформировано и ускорено до 0.6–0.8 km/s без перерыва. Импульсная вспышка позволяла фотографировать только каждую третью макрочастицу. Все сфотографированные частицы были без видимых следов разрушения и имели характерный вид, показанный на рис. 4. В настоящее время ведется подготовка к инъекции частиц с частотой до 10 Hz из смеси дейтерия с водородом и фотографированием каждой частицы для определения надежности при длительной инъекции.

### Заключение

Предложенный и экспериментально проверенный способ формирования топливных макрочастиц с использованием шнекового экструдера позволяет принципиально решить проблему создания надежной системы для подпитки плазмы термоядерных реакторов в непрерывном длительном режиме. Один экструдер такого типа удовлетворяет всем сегодняшним 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.

Авторы выражают признательность за поддержку и полезные обсуждения Б.В. Кутееву, а также В.Г. Капралову за ряд предоставленных электронных блоков.

## Список литературы

- [1] *Milora S.L., Houlberg W.A., Lenguel L.L., Mertens V.* // Nucl. Fusion. 1995. Vol. 35. P. 657–754.
- [2] *Combs S.K.* // Rev. Sci. Instr. 1993. Vol. 64. P. 1679–1698.
- [3] *Kuteev B.V., Viniar I.V., Sergeev V.Yu.* et al. // Fusion Technol. 1994. Vol. 26. P. 642–648.
- [4] *Виняр И.В., Кутеев Б.В., Скобликов С.В.* и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. С. 167–175.
- [5] *Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е.* // Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1965. 363 С.