

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.039.6+533.9.08

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ИНЖЕКТОРЫ ПУЧКОВ
БЫСТРЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА – ДИНА-6 И ДИНА-7**

© 1996 г. Е. Д. Бендер, С. А. Вибе, В. И. Давыденко, Г. И. Димов, Ю. В. Коваленко,
В. Я. Савкин, Г. И. Шульженко

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск-90, просп. Акад. Лаврентьева, 11*

Поступила в редакцию 15.03.96 г.

Для диагностики плазмы в токамаках средних размеров и открытых ловушках разработаны и испытаны диагностические инжекторы ДИНА-6 и ДИНА-7. Инжектор ДИНА-6 формирует пучок атомов водорода с энергией 30 кэВ и эквивалентным током 1.4 А, инжектор ДИНА-7 – пучок атомов с энергией 40 кэВ и эквивалентным током 0.7 А. Рабочий цикл инжекторов состоит из серии 20 миллисекундных импульсов с промежутками между импульсами ≥ 15 мс.

Для корпускулярной диагностики плазмы в токамаках средних размеров и открытых ловушках разработаны диагностические инжекторы ДИНА-6 и ДИНА-7. В отличие от предыдущих инжекторов этой серии [1–4], в них повышена энергия атомов пучка и изменен временной режим работы. Значительно изменены конструкция инжекторов и их система питания.

Инжекторы ДИНА-6 и ДИНА-7 имеют почти одинаковую конструкцию, показанную на рис. 1. Инжектор состоит из ионного источника, перезарядной трубки и вакуумного сорбционного насоса.

Плазменный эмиттер с малой поперечной ионной температурой создается в ионном источнике плазменной струей, вытекающей из анодного отверстия дугового генератора. Чтобы импульс поддерживался в течение 1 мс, в генераторе плазмы используется дополнительная подача водорода в прианодную область разряда. Для уменьшения расхода водорода подается в прианодную область через импульсный клапан со сверхзвуковым соплом.

Для формирования пучка используется многоапертурная четырехэлектродная ионно-оптическая система со сферически вогнутыми электродами [5]. Радиусы кривизны первых трех электродов – плазменного, вытягивающего и ускоряющего – разные, что необходимо для оптимального формирования протонного пучка из плазменной струи с радиально спадающим распределением плотности [5]. Радиус кривизны четвертого заземленного, электрода равен радиусу кривизны ускоряющего электрода.

В инжекторе ДИНА-6 плазменный электрод изготовлен из тантала толщиной 0.5 мм, вытягивающий электрод – из ниобия толщиной 0.3 мм, а ускоряющий и заземленный электроды – из нио-

бия толщиной 1 мм. В инжекторе ДИНА-7 все электроды изготовлены из ниобия толщиной 1 мм. Между плазменным и вытягивающим электродами вставлен дополнительный центральный изолятор из алунда, что позволяет избежать изменения зазора между ними во время работы. Начальный диаметр пучка составляет 7 см. В инжекторе ДИНА-6 пучок формируется 294-мя круглыми апертурами $\varnothing 3$ мм, образующими гексагональную структуру с шагом 3.75 мм, а в инжекторе ДИНА-7 – 150-ю апертурами $\varnothing 4$ мм с шагом структуры 5 мм.

Чтобы увеличить скорость откачки экспандерного объема ионного источника, в боковой поверхности экспандерного объема прорезаны дополнительные отверстия для вытекания водорода. Вытекающий водород вначале проходит через лабиринт, предотвращающий выход ионов за счет их нейтрализации на стенках. Для экранирования от внешнего магнитного поля ионный источник окружен двойным магнитным экраном. Внешним экраном служит вакуумный корпус инжектора, а внутренний изготовлен из пермаллоя толщиной 2 мм.

Пермалловая перезарядная трубка, установленная внутри вакуумного насоса, является частью внутреннего магнитного экрана тракта пучка. Чтобы увеличить подачу водорода, импульсный газовый клапан установлен непосредственно на перезарядной трубке. Клапан включается за 600 мкс перед импульсом пучка и за импульс в перезарядную трубку подается $\sim 10^{17}$ молекул водорода. Вакуумный сорбционный насос с импульсным электродуговым распылителем титана имеет скорость откачки $2 \cdot 10^4$ л/с. Его конструкция близка к описанной в работах [6, 7]. Насос с ребристой внутренней поверхностью имеет два кольцевых электродуговых распылителя. Для защиты

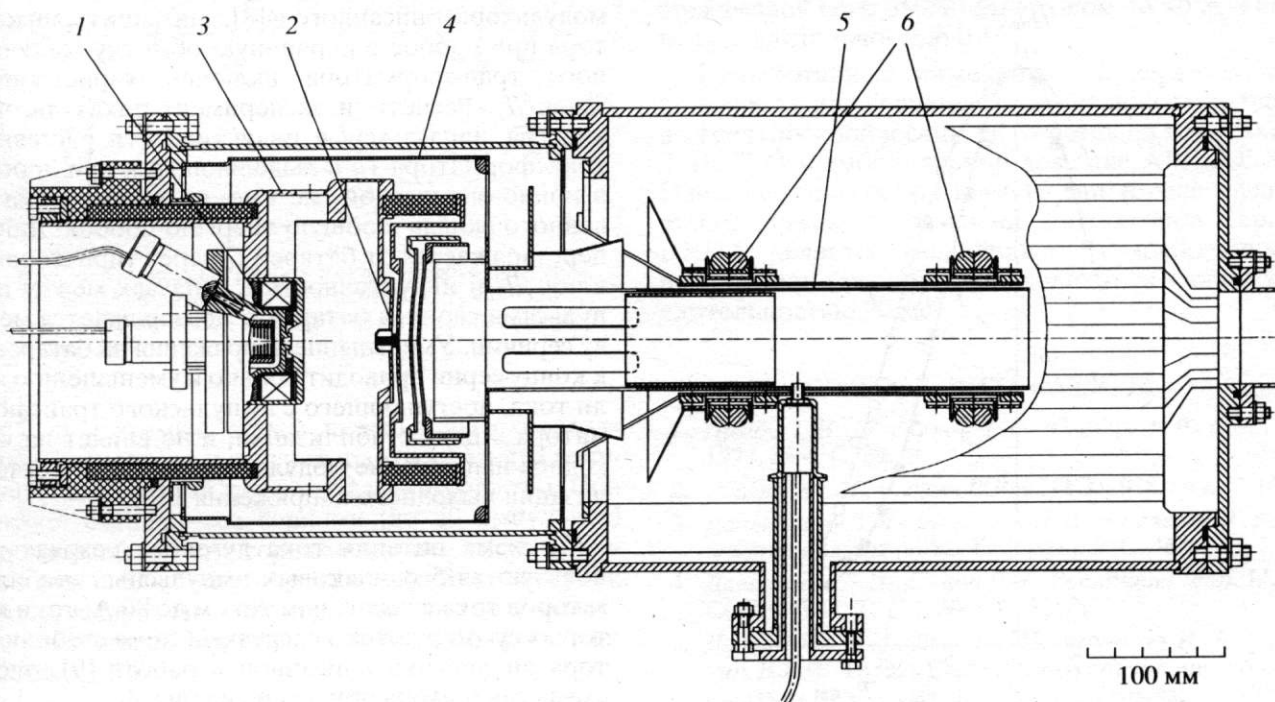


Рис. 1. Конструкция инжектора. 1 – генератор плазмы, 2 – ионно-оптическая система, 3 – корпус экспандера, 4 – внутренний магнитный экран, 5 – перезарядная трубка, 6 – электродуговые распылители титана.

ионно-оптической системы от распыляемого титана служат экраны.

Стендовые испытания инжекторов показали, что измеренные характеристики пучка соответствуют расчетным. В инжекторе ДИНА-6 при энергии 30 кэВ ток протонного пучка составил 2.5 А, в инжекторе ДИНА-7 при энергии 40 кэВ – 1.8 А. Поток атомов из инжектора ДИНА-6 эквивалентен 1.4 А, а из инжектора ДИНА-7 – 0.7 А. На рис. 2 приведены профили потока атомов в пучках инжекторов ДИНА-6 и ДИНА-7, измеренные на расстоянии 2.5 м от ионного источника. Они согласуются с расчетом при фокусных расстояниях 2.5 и 4 м и угловой расходимости 1.2×10^{-2} и 1.5×10^{-2} рад соответственно для инжекторов ДИНА-6 и ДИНА-7. Измеренные плотности потока атомов в максимуме составляют 49 и 14 $\text{мА}/\text{см}^2$ для инжекторов ДИНА-6 и ДИНА-7 соответственно, расчетные – 50 и 15 $\text{мА}/\text{см}^2$.

В режиме генерации инжекторами серии из 20 импульсов с промежутками 15 мс между ними воспроизводимость тока пучка в импульсах оказалась не хуже 10%. Однако при сокращении промежутка между импульсами обнаружился эффект накопления газа в ионном источнике, который приводил к повышению вероятности пробоев. В режиме однократных импульсов вероятность пробоев не превышала 2%, а в сериях из 15–20 импульсов она достигала 20–30% (промежуток между импульсами < 15 мс). При увеличении длитель-

ности промежутка до 30 мс вероятность пробоя снижалась в несколько раз. Для устранения этого эффекта необходимо несколько изменить конструкцию экспандера, что мы планируем выполнить в дальнейшем.

Система электропитания расположена в силовом шкафу, соединенном с ионным источником высоковольтным кабелем. Путь управления связан со шкафом жгутом оптоволоконной связи.

С пульта можно устанавливать число рабочих импульсов в серии и последовательность синхронимпульсов, задающих временную диаграмму работы узлов системы питания. В пульте используется микропроцессор 580ВМ80 с о.з.у. (4К) и п.з.у. (4К). Возможна работа как при ручном управлении с панели пульта, так и с управлением от внешней э.в.м. Пульт связан с последовательным портом э.в.м. в стандарте RS232c через дополнительный блок связи, расположенный рядом с э.в.м. Информация о работе системы питания передается из силового шкафа в пульт по четырем каналам оптоволоконной связи. Эта информация запоминается и хранится в памяти пульта.

В силовом шкафу расположены блоки питания ионного источника. По составу и выходным параметрам применяемая аппаратура аналогична описанной в работах [8, 9], однако вновь разработанные схемы позволяют работать с укороченными промежутками между импульсами – до 8 мс.

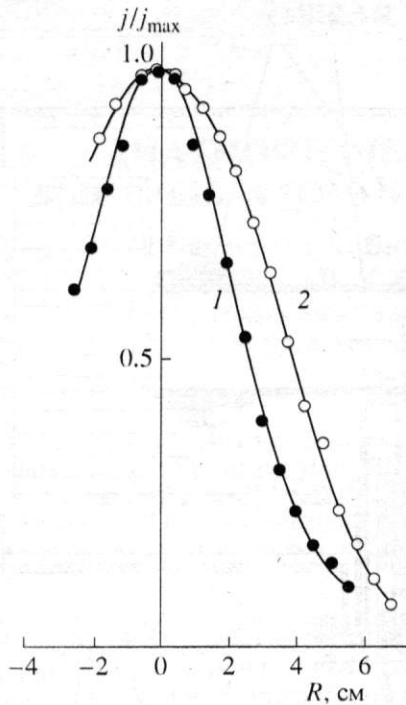


Рис. 2. Профили потока атомов, измеренные на расстоянии 2.5 м от инжектора. 1 – ДИНА-6, 2 – ДИНА-7.

В системе питания используется батарея электролитических конденсаторов типа К50-17 большой удельной энергоемкости. Запасенной энергии достаточно для формирования 20 импульсов тока газового разряда амплитудой 400 А при напряжении до 150 В и импульсов ускоряющего напряжения до 30 кВ при токе 3 А или до 40 кВ при токе 2 А и длительности 1 мс.

Упрощенная схема, поясняющая работу высоковольтного модулятора, приведена на рис. 3. Высоковольтный импульс формируется при разряде LC-линии с волновым сопротивлением 4 Ом (при напряжении заряда 1800 В) через тиристорный ключ D_1 и импульсный повышающий трансформатор Tr . Напряжение на нагрузке стабилизируется параллельной цепью параметрической стабилизации на варисторах СН-2-2 и регулируется числом включенных варисторов. В отличие от

модулятора, описанного в [8], для защиты инжектора при пробое в первичную обмотку импульсного трансформатора включен тиристорный ключ D_2 . Расчеты и эксперимент показали, что энергия, запасаемая в индуктивности рассеяния трансформатора Tr и выделяющаяся при пробое в ионно-оптической системе, не вносит существенного вклада в общую энергию пробоя. Линия перезаряжается от батареи C через тиристорный ключ D_3 и индуктивность L в паузах между импульсами серии, а батарея C подзаряжается между сериями. Уменьшение напряжения на батарее C к концу серии приводит только к уменьшению доли тока, поступающего с импульсного трансформатора в цепь стабилизации, и не влияет на выходное напряжение модулятора. Точность стабилизации выходного напряжения $\pm 1\%$.

В схеме питания тока дугового разряда используются 5 одинаковых импульсных стабилизаторов тока с выходным током до 80 А, токи которых суммируются в нагрузку. Схема стабилизатора аналогична описанной в работе [9], блок-схема генератора приведена на рис. 4.

За 3 мс до начала очередного импульса серии включаются транзисторы стабилизаторов ST и начинается процесс увеличения тока через индуктивности L при открытом тиристоре D_1 . По достижении заданной величины ток стабилизируется переключениями транзистора T по принципу релейной стабилизации. Перед поджигом дугового разряда включается тиристор D_2 , тиристор D_1 выключается и ток перебрасывается в дуговой генератор ионного источника. Через 1 мс тиристор D_1 включается вновь, разряд гаснет, и транзисторы стабилизаторов отключаются. Импульс тока газового разряда величиной до 400 А формируется при напряжении горения от 50 до 150 В и длительности фронтов нарастания и спада в несколько микросекунд. Энергия в накопительных батареях C выбрана такой, чтобы напряжение на батареях к концу серии не падало ниже предельного напряжения горения разряда в ионном источнике (~ 150 В). Для дополнительной стабилизации тока разряда служит параллельный стабилизатор на транзисторах, точность стабилизации $\pm 1\%$.

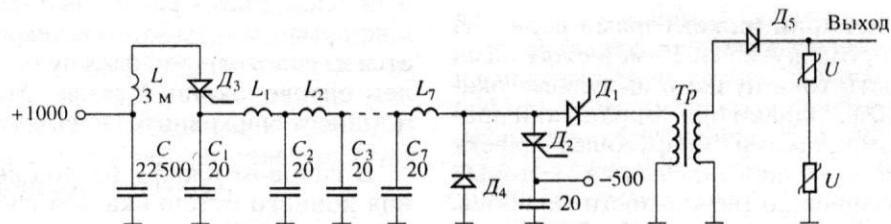


Рис. 3. Схема высоковольтного модулятора. D_1 – D_3 – ТБ251-100-12 (последовательно 2 шт. (D_1 , D_3), 3 шт. (D_2)), D_4 – ДЛ132-80-12 (2 шт. последовательно), D_5 – СДЛ-0,4-750; C – К50-17-1500 мкФ \times 300 В (240 шт. параллельно-последовательно); C_1 – C_7 – К75-40-20 мкФ \times 2000 В; L_1 – L_7 – 350 мкГн.

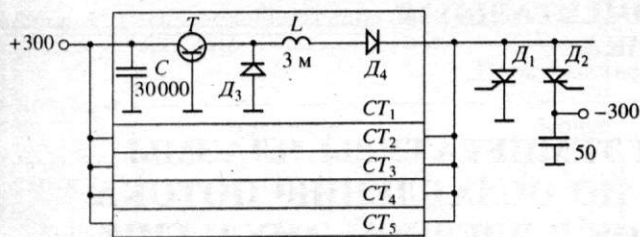


Рис. 4. Схема генератора тока дугового разряда. Т – ТК-235-40-4 (2 шт. параллельно); D_1, D_2 – ТЧ-125-9, D_3, D_4 – Д480-10; С – К50-17-1500 мкФ \times 300 В (20 шт. параллельно).

Используемые схемы питания высоковольтного модулятора и генератора тока разряда допускают следующий временной режим работы. При работе с длинными сериями (до 20 импульсов) промежуток между сериями должен быть не менее 2 мин. Для более коротких серий промежутки между импульсами пропорционально сокращаются. Одиночные импульсы могут следовать с частотой 0.1 Гц.

Пульт управления расположен в каркасе стандарта "Вишня" размером 30 \times 60 \times 60 см. Габариты шкафа питания 1 \times 1 \times 2 м. Длина силового кабеля, связывающего шкаф с инжектором, 6 м. Длина оптоволоконных кабелей связи 30 м. Блок питания титанового насоса габаритами 40 \times 60 \times 80 см расположен вблизи инжектора. Питание силового шкафа и пульта управления осуществляется от сети 220 В/50 Гц при средней потребляемой мощности <1 кВт. Питание титанового насоса – от

трехфазной сети 380/50 Гц с током до 40 А в импульсе длительностью 0.1 с.

Разработанные инжекторы планируется использовать для современных, в основном пучково-спектроскопических, диагностик на токамаках Т-10, Т-11 и амбиполярной ловушке АМБАЛ-М. Наиболее целесообразным, на наш взгляд, следующим шагом в развитии инжекторов серии ДИНА является модификация разработанных инжекторов для получения одиночных импульсов длительностью 20 мс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Димов Г.И., Росляков Г.В., Савкин В.Я. // ПТЭ. 1977. № 4. С. 29.
2. Росляков Г.И., Савкин В.Я. // ПТЭ. 1978. № 1. С. 148.
3. Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. Вып. 2. С. 464.
4. Давыденко В.И., Димов Г.И., Росляков Г.В. // ДАН СССР. 1983. Т. 271. № 6. С. 1380.
5. Давыденко В.И., Димов Г.И., Морозов И.И., Савкин В.Я. // Труды Всесоюзного совещания по открытым ловушкам. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 24.
6. Бендер Е.Д. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1987. Вып. 4. С. 41.
7. Белкин В.С., Бендер Е.Д. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1987. Вып. 4. С. 49.
8. Белкин В.С., Савкин В.Я. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1983. Вып. 2. С. 71.
9. Савкин В.Я. // ПТЭ. 1986. № 5. С. 138.