

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПРЕРЫВАТЕЛЕЙ ТОКА С ИМПУЛЬСНЫМИ ГАЗОВЫМИ ПУШКАМИ

*П. С. Ананьин, В. Б. Карпов, Я. Е. Красик, И. В. Лисицын, А. В. Петров,
В. Г. Толмачева*

Приведены результаты экспериментальных исследований режимов работы микросекундного плазменного размыкателя (ПР) тока, установленного на генераторе «Дубль» ($U_r = 480$ кВ, $r_r = 1.1$ Ом, $C_r = 0.533$ мкФ). В качестве источника плазмы в ПР использовались четыре плазменные пушки с импульсным напуском газа, позволяющие получать в зависимости от сорта используемого рабочего газа плазму с различным массовым составом и регулируемой концентрацией и потоковой скоростью. Исследования показали, что лучшие режимы наблюдаются при использовании легкой плазмы (H^+ , D^+ , He^+), при этом напряжение при разрыве ПР достигало 3.2 МВ, а импеданс ПР ~ 20 Ом. Увеличение массы ионов плазмы приводит к резкому ухудшению характеристик переключения. Показано, что даже при использовании не водородной плазмы доминирующей фракцией в генерируемом при разрыве ПР ионном пучке были ионы водорода. Отмечено также, что увеличение массы ионов в предварительно созданной плазме не уменьшает аксиальную протяженность ПР. В работе приведены данные по нейтронным потокам, генерируемым при взаимодействии протонных либо дейтонных пучков с мишенями из графита и лития.

Введение

В проведенных в последние годы исследованиях по микросекундным плазменным размыкателям тока (ПР) [1-3] для создания плазмы использовались пушки эрозийного типа [4] коаксиальной либо полосковой геометрии. Такого типа источники обеспечивают возможность получения плазменных сгустков с концентрацией и потоковой скоростью, варьируемыми в широких диапазонах $10^{12}-10^{14}$ см $^{-3}$ и 10^6-10^7 см/с. Исследования массового состава ионов этой плазмы показали ее неоднородный состав, а именно наличие в ней ионов H^+ и C^{+n} [5, 6]. Соответственно при разрыве ПР, представляющих собой ионный диод с магнитной самоизоляции электронного потока [7, 8], генерируемый мощный ионный пучок (МИП) состоит из высокоэнергетичных ионов водорода и углерода.

В связи с этим представляется перспективным использование однокомпонентной плазмы в объеме ПР. Кроме этого, самостоятельный интерес представляют исследования, посвященные изучению характеристик микросекундного ПР в зависимости от сорта предварительно созданной плазмы.

В предлагаемой работе приводятся результаты экспериментальных исследований режимов работы микросекундного ПР и генерируемого в нем МИП в зависимости от сорта плазмы, созданной плазменными пушками (ПП) с импульсным напуском газа.

Экспериментальная установка и диагностика

Экспериментальные исследования были выполнены на микросекундном генераторе «ДУБЛЬ» [9] ($\rho = 1.1$ Ом, $C = 0.533$ мкФ), работающем в режиме отрицательной полярности выходного импульса с амплитудой напряжения 480 кВ. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, а.

Для создания плазмы в объеме ПР использовались четыре ПП, установленные симметрично по азимуту в патрубках внешней трубы диаметром 200 мм. Диаметр центрального электрода равнялся 45 мм. Индуктивность цепи до места расположения ПП составила ≈ 1.3 мкГ. Для диагностики МИП катод в области ПР был выполнен с продольными прорезями, обеспечивающими геометрическую прозрачность ≈ 0.28 . Внутри катода размещалась линейка графитовых

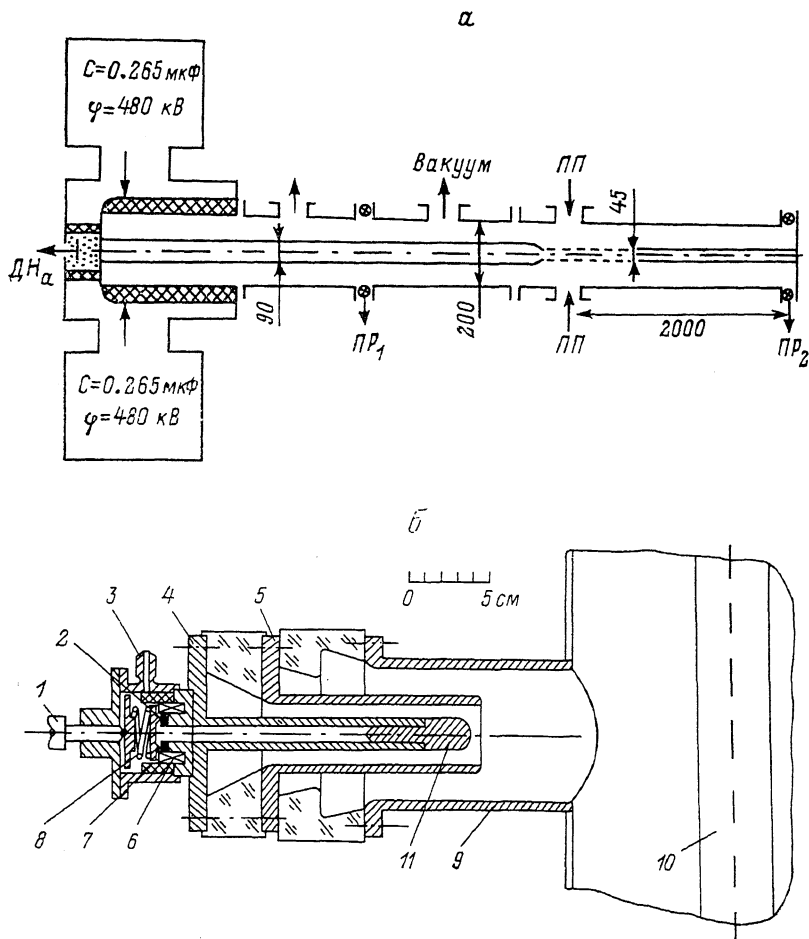


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и конструкция плазменной пушки с импульсным напуском газа (б).

6: 1 — регулировочный винт, 2 — клапан, 3 — штуцер подачи газа, 4 — центральный электрод, 5 — корпус, 6 — ударная катушка клапана, 7 — тефлоновая втулка, 8 — пружина, 9 — корпус генератора «Дубль», 10 — центральный электрод вакуумной линии, 11 — наконечник.

мишеней (цилиндры длиной 50 мм), с помощью которых определялось аксиальное распределение высокоэнергетичной протонной или дейтонной фракции МИП из реакции $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+)$ и $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}(\beta^+)$ путем измерения наведенной активности после срабатывания ПР. Амплитуды токов до и после ПР определялись по показаниям поясов Роговского, установленных до и после размыкателя. Напряжение на ПР восстанавливалось из показаний активного делителя напряжения, установленного в масляном объеме вакуумного изолятора, в которые вводилась коррекция на индуктивное падение напряжения на участке от его расположения до плоскости ПП. В экспериментах проводились измерения нейтронных потоков, генерируемых при взаимодействии протонных (дейтонных) пучков с мишенями из ^{12}C и ^7Li ; $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$, $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$, $^7\text{Li}(d, n)^8\text{Be}$, $^7\text{Li}(d, 2n)^2^4\text{He}$, устанавливаемыми внутри катода или в торце внешнего электрода коаксиала при реализации геометрии с разомкнутым потенциальным электродом. Измерения проводились ионизационными счетчиками, покрытыми

слоем активируемого серебра и размещенными в полиэтиленовых блоках. Калибровка датчиков проводилась «по месту» стандартным нейтронным источником. Всего использовалось три датчика, два из которых устанавливались под различными углами относительно мишени, а один датчик был опорным и служил для относительной привязки полученных значений в разных срабатываниях генератора. Энергетический спектр нейтронов определялся по активации стопы фольг из ^{115}In , ^{63}Cu , ^{27}Al , ^{54}Fe в реакциях $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$, $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$, $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$, $^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$, имеющих энергетические пороги 1.15, 3, 4.5, 12.9 МэВ соответственно.

Как уже говорилось выше, для создания плазмы в объеме ПР использо-

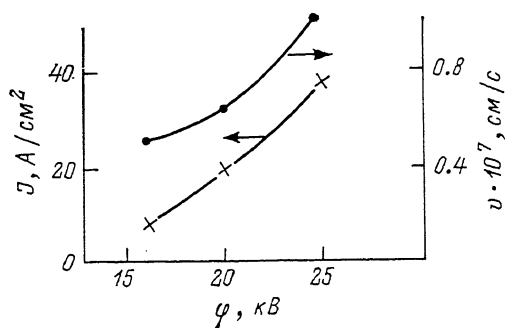


Рис. 2. Зависимости потоковой скорости v и ионного тока насыщения плазмы J_i от зарядного напряжения φ_3 . Газ H_2 , $\tau_3 = 135$ мкс.

вались четыре ПП с импульсным напуском газа. Режимы работы такого рода пушек были хорошо изучены ранее в исследованиях [10—12]. Конструкция используемых ПП приведена на рис. 1, б. Газ в рабочий объем ПП подавался по полуму заземленному внутреннему электроду через систему отверстий, выполненных в нем на расстоянии 6 см от торца пушки. Поступление газа в центральный электрод обеспечивалось открытием клапана при срабатывании ударной катушки, создающей импульсное магнитное поле ($T_{1/4} = 10$ мкс) с напряженностью до

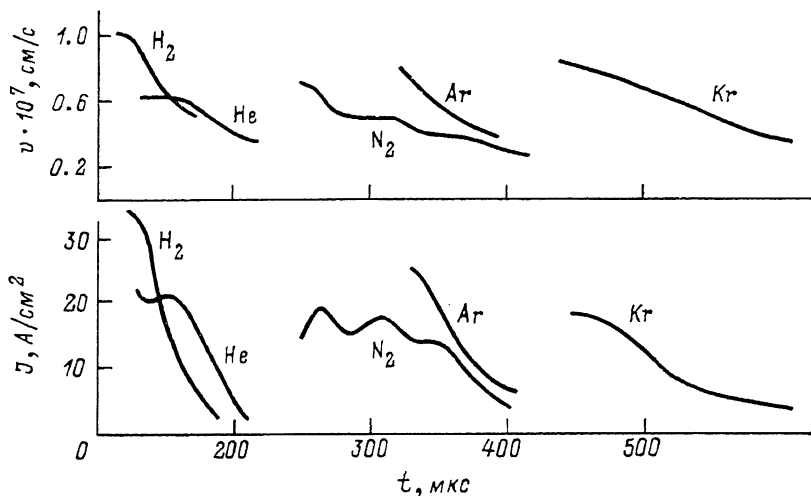


Рис. 3. Зависимости потоковой скорости и ионного тока насыщения плазмы от времени задержки между началом токового импульса на катушку клапана и моментом электрического пробоя газа в межэлектродном зазоре плазменной пушки (τ_3).

1 Тл и более. Питание ударных катушек клапанов осуществлялось от многоканального генератора с независимыми выходами. Каждый канал имел конденсатор типа К41И-7 100 мкФ, 5 кВ. Коммутация конденсаторов производилась одним ртутным разрядником типа ИРТ-6. После изготовления и сборки ПП проводилась настройка работы их клапанов путем подбора напряжения на генераторе питания клапанов и упругости поджимающих пружин до достижения временного разброса открывания не более ± 2 мкс. Разброс моментов открывания клапанов определялся по моменту прихода газа на датчик Пеннинга, который устанавливался вблизи выходных отверстий центрального электрода. Таким же образом были измерены скорости потоков газов различного сорта: H_2 , He , N_2 , Ar , Kr (табл. 1). Длительность переднего фронта газового импульса состав-

вила ≈ 200 мкс, при этом давление в рабочем объеме ПП изменялось от 10^{-4} до 0.6 Тор, что, учитывая скорость нейтралов, обеспечивало количество поступающего газа от $4 \cdot 10^{20}$ для H_2 до 10^{20} для Kr.

Таблица 1

Газ	t_0 , мкс	$v \cdot 10^4$, см/с	Газ	t_0 , мкс	$v \cdot 10^4$, см/с
H_2	135	8.9	N_2	235	5.1
D_2	140	8.6	Ar	270	4.45
He	145	8.3	Kr	395	3.05

Поступление высоковольтного импульса положительной полярности ($20 < \varphi < 35$ кВ) на внешний электрод ПП обеспечивалось генератором, собранным на конденсаторах ИК-50-23У4 (3 мкФ, 50 кВ), коммутируемых газовым разрядником с тригatronным поджигом. К каждой ПП был подключен один конденсатор. Зависимости потоковой скорости и ионного тока насыщения генерируемого плазменного сгустка, полученные с помощью двух разнесенных в пространстве коллимированных цилиндров Фарадея (КЦФ) с отрицательным смещением на коллекторах ($\varphi_{см} \leq -100$ В), от зарядного напряжения на генераторе приведены на рис. 2. На рис. 3 приведены зависимости потоковой скорости и ионного тока насыщения плазмы от времени задержки между началом подачи токового импульса на клапан пушки и моментом электрического пробоя газа в межэлектродном зазоре ПП. Из приведенных зависимостей, а также из данных, полученных с помощью двойного лэнгмюровского зонда, следует, что, варьируя зарядным напряжением на генераторе ПП и временной задержкой поступления высоковольтного импульса на ПП, можно в широком диапазоне изменять параметры (потоковую скорость и концентрацию) генерируемой плазмы.

Исследования проводились в двух режимах работы ПР: при использовании в качестве нагрузки короткозамкнутой линии ($L \approx 0.6$ мкГ) и с разомкнутым потенциальным электродом длиной 60 см от плоскости расположения ПП. В последнем случае, как было показано в предыдущих исследованиях [13, 14], в стадии переключения в области ПР формируется сильноточный электронный пучок, нейтрализованный по заряду и эффективно распространяющийся в вакууме. В этом электронном пучке реализуется коллективное ускорение ионов, подробно исследованное в работе [15].

Экспериментальные результаты

Основные параметры переключения в зависимости от сорта предварительно созданной в объеме ПП плазмы в случае короткозамкнутой нагрузки приведены в табл. 2. Данные приведены для времени накопления тока 800—850 нс, что

Таблица 2

Газ	$\varphi_{пр}$, кВ	$P_{пр} \cdot 10^{11}$, Вт	$z_{пр}$, Ом	$t_{1/2}$, нс	$W_{пр}$, кДж	$P_{и} \cdot 10^{11}$, Вт	I , кА
H_2	1700 ± 360	2.21	16.8	102	6.04	1.59	213
D_2	1500 ± 430	2.05	13.4	98	5.14	1.37	221
He	1100 ± 200	1.57	10.9	94	4.81	1.18	219
N_2	1000 ± 150	1.34	11.1	80	4.63	1.15	212
Ar	830 ± 100	1.42	5.3	90	5.97	0.71	229

соответствовало амплитуде тока в цепи индуктивности L_0 ПР на уровне 200—250 кА и максимальному значению напряжения при переключении и усреднены по 8—10 срабатываниям при идентичных условиях. Из приведенных результатов следует однозначный вывод о преимуществе использования для создания

плазмы в ПР легких газов для получения лучших характеристик. Так, при использовании H_2 усредненная по 10 срабатываниям генератора амплитуда напряжения на ПР равнялась 1.7 ± 0.36 МВ при $z_{ПР} \sim 17$ Ом, тогда как при использовании Ar напряжение составило 0.83 ± 0.1 МВ при $z_{ПР} \sim 5.3$ Ом. Максимальное значение напряжения при инжектировании водородной или дейтериевой плазмы достигало 2.5 МВ. Мощность в ППТ в этом случае равнялась 0.3 ТВт при $z_{ПР} \sim 20$ Ом. Необходимо отметить,

что при разрыве ПР, когда амплитуда напряжения превышала 1.5 МВ, наблюдалась модуляция импульсов напряжения и тока с характерным временем между максимумами 30 ± 5 нс. В серии экспериментов с разомкнутым потенциальным электродом наибольшие значения напря-

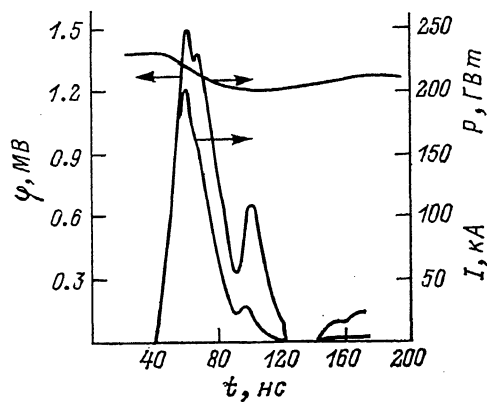


Рис. 4 Характерные импульсы тока до ПР, восстановленного напряжения и мощности в ПР.

жения были получены также при инъекции легкой (H^+ , D^+) плазмы и достигали значений 3.2 МВ, что соответствует коэффициенту умножения по напряжению 6.7. Значение максимальной мощности в ПР в этом случае равнялось 0.7 ТВт. Характерные осциллограммы импульсов напряжения и тока I_0 , а также изменения мощности в ПР приведены на рис. 4.

Визуальные наблюдения поверхности центрального электрода в случае нагрузки в виде короткозамкнутой линии показали, что независимо от сорта

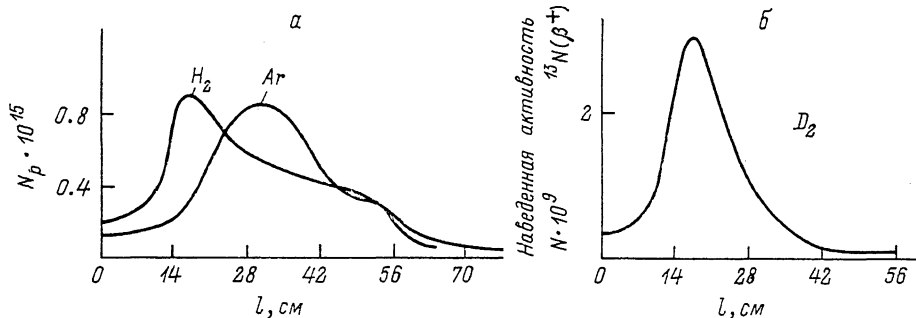


Рис. 5. Аксиальное распределение высокоэнергетичной протонной фракции ($E_p > 600$ кэВ) в ПР для случаев предварительно созданной плазмы из H_2 и Ar (а) и аксиальное распределение выхода ^{14}N (β^+) при использовании дейтериевой плазмы (б).

инжектируемой плазмы протяженность повреждений на поверхности (ее подировка) составляет десятки сантиметров (60—80 см). При определении распределения протонной фракции ионного пучка вдоль ПР в случае использования различных сортов инжектируемой плазмы (H^+ , N^+ , Ar^+) было получено, что интегральное количество протонов ($E_p > 600$ кэВ) практически не зависело от сорта рабочего газа в ПП. Соответствующие кривые для случаев использования газов H_2 и Ar приведены на рис. 5, а. Из приведенных на рис. 5, а зависимостей следует, что при практически равном интегральном потоке протонов ($5.6 \cdot 10^{15}$ для H_2 и $5.3 \cdot 10^{15}$ для Ar) максимум плотности протонного потока в случае использования предварительно созданной более тяжелой плазмы оказывается смещенным в сторону нагрузки на 14 см.

При использовании в ПП дейтерия и определения интегрального количества дейтронов и их аксиального распределения по ядерно-активационной методике

Таблица 3

Условия	Реакции	Средний выход	Максимальный вклад
Короткозамкнутая индуктивность Мишень ^{12}C	$^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N} (\beta^+)$	$5 \cdot 10^8 (4.5 \cdot 10^8)$	10^9
Катод длиной 60 см	$^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N} (\beta^+)$	$1.3 \cdot 10^9$	$2.1 \cdot 10^9$
Катод длиной 60 см	$^7\text{Li}(d, n)^8\text{Be}$		
Мишень из ^7Li внутри катода	$2\text{He}^4(\text{Be}^8)^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$	$3 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$
Мишень из ^7Li в торце трубы дрейфа на расстоянии 60 см от конца катода	$2\text{He}^4(\text{Be}^8)^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$	$3 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$

при разрыве ПР влиянием протонов на образование $^{13}\text{N} (\beta^+)$ пренебрегалось в связи с тем, что выход в реакции $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N} (\beta^+)$ на 3—5 порядков меньше, чем в реакции $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N} (\beta^+)$ в нашем диапазоне энергии ионов. Аксиальное распределение выхода $^{13}\text{N} (\beta^+)$, полученное в реакции $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N} (\beta^+)$ приведено на рис. 5, 6. Пересчет на полное количество дейтронов производился с учетом реальной формы импульса напряжения и дал значение $2.8 \pm 1.4 \cdot 10^{14}$ дейтронов, что составляет около 5 % от всех высокоэнергетичных ионов, генерируемых при разрыве ПР в радиальном направлении. Сравнение среднего выхода нейтронов в реакции $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N} (\beta^+)$ с результатами активационного анализа, когда мишень из углерода располагалась внутри катода, дало хорошее согласие ($5 \cdot 10^8$ и $4.5 \cdot 10^8$ нейтронов соответственно).

Данные по импульсным нейтронным потокам, генерируемым при взаимодействии протонных и дейтронных пучков с мишенями из ^{12}C и ^7Li , представлены в табл. 3. Здесь приведены результаты экспериментов для случаев как короткозамкнутой нагрузки, так и с разомкнутым потенциальным электродом, когда мишень устанавливалась на расстоянии 50 см от его торца. В последнем случае на мишени из ^7Li наблюдался ярко выраженный отпечаток пучка диаметром не более 25 мм. Как следует из данных, приведенных в табл. 3, интегральный поток нейтронов из углеродной мишени при короткозамкнутой нагрузке не превышал 10^9 н/имп. При использовании коллективно ускоренных ионов максимальный выход на мишени из ^7Li достигал $5 \cdot 10^{10}$ н/имп. Спектр нейтронов в этом случае лежал в основном в низкоэнергетической области (≤ 1.15 МэВ) и только $1.6 \cdot 10^6$ от всего генерируемого потока принадлежало нейтронам с энергией ≥ 13 МэВ и $2 \cdot 10^9$ нейтронов с энергией > 1.15 МэВ при среднем нейтронном потоке $\approx 2 \cdot 10^{10}$ н/имп.

Анализ экспериментальных результатов и выводы

Прежде всего проведенные исследования показали, что использование высокоскоростных ($\geq 10^7$ см/с) потоков плазмы из H^+ , D^{+n} , He^{+n} -позволяет в среднем в 1.5—2 раза улучшить характеристики ППТ (увеличить его импеданс и генерируемое напряжение) по сравнению с обычно используемыми источниками плазмы эрозионного типа. При увеличении массы ионов генерируемой плазмы режимы работы ПР ухудшались, однако интегральное количество высокоэнергетичных ($E \geq 600$ кэВ) протонов при этом оставалось на том же уровне, что и при использовании водородной плазмы. Этот экспериментальный факт, по-видимому, может быть связан с поверхностными явлениями, имеющими место при взаимодействии плазменных потоков с центральным электродом. Такие явления, как ионное распыление, вторичная ионная эмиссия и рекомбинационные процессы, могут приводить к появлению большого количества нейтронов в приэлектродной области из углеводородной поверхностной пленки на центральном электроде. При использовании более тяжелой плазмы эти явления протекают более интенсивно, чем в случае плазмы с малым атомным весом ионов [16]. Наличие нейтронов в приэлектродной области ПР приводит к их ионизации и дополнительной наработке плазмы в этой области, что в свою очередь при реализации эрозионных процессов в высоковольтной стадии пере-

ключения энергии выразится в меньшем значении ширины образующегося двойного слоя [17] и соответственно большими электронными потерями.

Существенная роль приповерхностных процессов, связанных с наработкой дополнительной плазмы, объясняет также полученные результаты по аксиальному распределению высокоэнергетичной протонной фракции вдоль ПР и отсутствию уменьшения аксиальной протяженности ПР при увеличении атомного веса ионов предварительно созданной плазмы.

Полученные результаты по модуляции импульса напряжения при реализации режимов с быстрым замыканием ($t_{\phi} \sim 15-20$ нс) могут быть связаны как с волновыми процессами (отражение электромагнитной волны от неоднородностей в накопительной индуктивности), так и с неустойчивостями в режиме работы самого ПР и требуют проведения дополнительных исследований.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Использование плазменных пушек с импульсным напуском газа при генерации плазмы с малым атомным весом ионов (H^+ , D^+ , He^+) позволило существенно (в 1.5—2 раза) улучшить характеристики ПР, а именно при амплитуде тока 200—250 кА и времени до разрыва 0.8—0.9 мкс увеличить импеданс ПР до 20 Ом и напряжение до 2.5 МВ и более.

2. Увеличение массы ионов, инжектируемой в область ПР плазмы, приводит к ухудшению его характеристик и не уменьшает аксиальную протяженность размыкателя по водородной составляющей.

3. Массовый состав генерируемого при разрыве ПР ионного пучка не определяется параметрами предварительно созданной плазмы, что затрудняет его использование в качестве ионного диода.

4. Использование дейтериевой плазмы в ПР позволило получить при накопленной в индуктивности энергии 30 кДж импульсный нейтронный поток $\sim 5 \cdot 10^{10}$ (энергетическая цена $6 \cdot 10^{-7}$ Дж/ π) с максимальной плотностью потока 10^{17} н/с·см².

В заключение авторы выражают благодарность за стимулирующие дискуссии В. М. Быстрицкому и А. А. Синебрюхову и за помощь в проведении отдельных этапов исследований С. Н. Волкову и В. А. Рыжкову.

Список литературы

- [1] Ковальчук Б. М., Месяц Г. А. // ДАН СССР. 1985. Т. 284. № 4. С. 857—859.
- [2] Месяц Г. А., Диденко А. Н., Абдуллин Э. Н. и др. // ДАН СССР. 1986. Т. 289. № 1. С. 84—87.
- [3] Долгачев Г. И., Закаатов Л. П., Скорюпин В. А. // Физика плазмы. 1987. Т. 13. № 6. С. 760—767.
- [4] Зыков В. Г., Степаненко И. А., Толок В. Т. // Исследование плазменных сгустков. Киев, 1969. Вып. 4. С. 40—42.
- [5] Mendel C. W., Zagar D. M., Mills G. S. et al. // Rev. Sci. Instr. 1980. Vol. 51 (12). P. 1641—1645.
- [6] Commisso R. J., Hinshelwod D. D., Neri J. M. et al. // NRL Memorandum Report. N 6057. Vienna, 1987. VA. P. 55—63.
- [7] Абдуллин Э. Н., Баженов Г. П., Быстрицкий В. М. и др. // Физика плазмы. 1987. Т. 13. № 9. С. 1027—1034.
- [8] Голованов Ю. П., Долгачев Г. И., Закаатов Л. П. и др. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988. Ч. 3. С. 28—30.
- [9] Ананьин П. С., Бугаев С. П., Иванов И. Б. и др. // ПТЭ. 1989. № 5. С. 44—49.
- [10] Калмыков А. А. Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. А. И. Морозова. Минск: Наука и техника, 1974. С. 48—77.
- [11] Вальков Ю. А., Комельков В. С., Скворцов Ю. В. // Физика плазмы / Под ред. С. Ю. Лукьянова. М.: Атомиздат, 1967. С. 51—57.
- [12] Калмыков А. А., Песков Л. В., Перегамент М. И. Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973. С. 183—191.
- [13] Крастелев Е. Г., Мозговой А. Г., Соловьев М. Ю. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988. Ч. 3. С. 10—12.
- [14] Ан В. Б., Ананьин П. С., Быстрицкий В. М. и др. Деп. в ВИНТИ. Изв. вузов. Физика. 1990. № 1957-90.
- [15] Бурдаков А. В., Койдан В. С., Рогозин А. И. // ЖЭТФ. 1981. Т. 80. Вып. 4. С. 1391—1408.

- [16] *Ивановский Г. Ф., Петров В. И.* Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
- [17] *Ottinger P. F., Goldstein S. A., Meger R. A. et al.* // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. N 3. P. 774—784.

Научно-исследовательский институт
ядерной физики
при Томском политехническом институте
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
11 июля 1990 г.
В окончательной редакции
18 февраля 1991 г.

