

РАСЧЕТЫ ПРОФИЛЯ ПЛОТНОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ИНЖЕКЦИИ РАБОЧЕГО ГАЗА В КАМЕРУ ПФ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2022 г. М. П. Галанин^а, Е. В. Грабовский^б, Н. М. Ефремов^б, М. К. Крылов^б, Я. Н. Лаухин^б, А. П. Лотоцкий^{б, *}, В. В. Лукин^{а, **}, А. А. Николашин^б, Д. Г. Панфилов^б, А. Г. Серяков^б, Ю. Н. Сулимин^б

^а Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

^б ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, Москва, Россия

*e-mail: lototsky@triniti.ru

**e-mail: lukin@keldysh.ru

Поступила в редакцию 20.07.2022 г.

После доработки 25.08.2022 г.

Принята к публикации 01.09.2022 г.

Приведены результаты расчетного и натурного моделирования параметров газовых потоков, инжектируемых в камеру плазменного фокуса с помощью быстродействующего (≈ 200 – 300 мкс) клапана. Поставленная цель проводимых работ – расширение возможности согласования установок плазменного фокуса при увеличении разрядных токов до величин выше 2–3 МА при исходном образовании токовой оболочки в плазме из тяжелых инертных газов. Результаты анализа сопоставлены с данными серии электроразрядных экспериментов, проведенных с гелиевой токовой оболочкой, обжимающей локализованную область с инжектированным дейтерием.

Ключевые слова: плазменный фокус, инжекция газов, дейтерий, токовая оболочка, нейтронный выход

DOI: 10.31857/S0367292122601114

1. ВВЕДЕНИЕ

Большинство плазменных установок с самосжимающимся разрядом типа плазменный фокус (ПФ) используют для разрядов предварительное наполнение камеры газом определенного давления. Род газа (аргон Ar, неон Ne, дейтерий D₂ или др.) зависит от целей применения или поставленной задачи экспериментов, однако начальная плотность газа должна быть согласована с генератором тока, обеспечивающим динамику ускорения и пинчевание токовой плазменной оболочки (ТПО) вблизи амплитудного значения тока. Известно также, что в разрядах при добавлении в основной рабочий газ D₂ небольшой фракции ксенона Xe, регистрируется увеличение величины нейтронного выхода Y_n (число нейтронов за импульс) [1].

С другой стороны, симметрия ТПО, образующейся при электрическом пробое газа и развитии разряда на поверхности изолятора в установке ПФ, ограничивает диапазон давлений наполняющего вакуумную камеру установки газа, который обычно находится в диапазоне 0.5–5 тор [2]. При превышении плотности газа азимутальная симметрия начального электрического пробоя на по-

верхности изолятора нарушается, что ведет за собой разрушение целостности ТПО вплоть до полного отсутствия пинчевания. В мировой практике экспериментальных исследований ПФ также известны попытки применить дополнительную инжекцию газовых струй наряду с предварительным заполнением газом рабочей камеры. В работе [3] в камеру установки, работающую на дейтерии, по оси установки инжектировалась струя неона или аргона. В работе [4] по оси инжектировалась дополнительная порция дейтерия. В эмпирически подобранном оптимальном режиме выход нейтронов заметно возрастал. Известны эксперименты с более сложными комбинациями наполнения газами камеры ПФ [5, 6], в которых с помощью точечных датчиков были выполнены предварительные измерения плотности рабочего газа. При этом полных данных о начальных газовых распределениях в работах не содержится. Такая информация особенно актуальна для работы с комбинацией различных газов, перемешивание которых на границах раздела оставляет неопределенность в экспериментальных условиях ПФ. В представленных ниже расчетах эти вопросы решены.

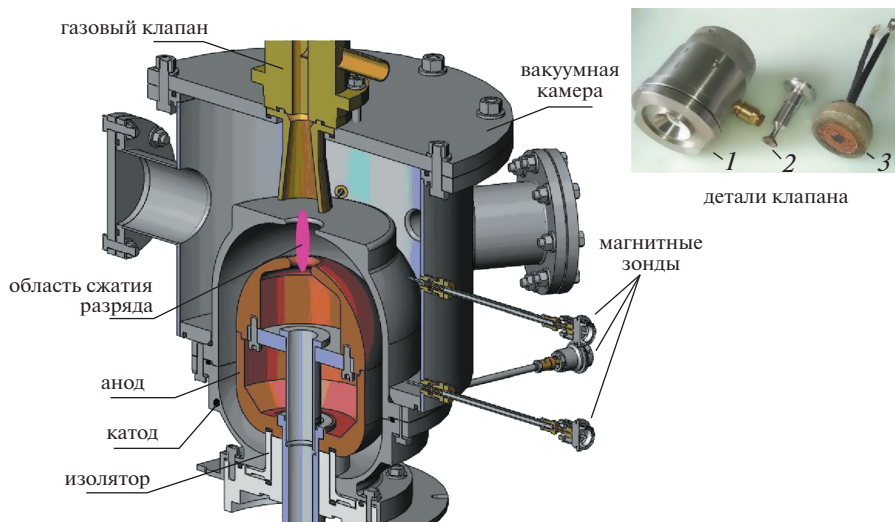


Рис. 1. Камера установки ПФ с импульсным клапаном напуска газа. На фото: 1 – корпус клапана; 2 – запорный элемент; 3 – катушка электромагнитного толкателя.

2. УСТРОЙСТВО ПФ С КЛАПАНОМ И ПАРАМЕТРЫ

Обсуждаемая компоновка устройства ПФ с инжекцией газа показана на рис. 1.

Направление инжекции газа – встречное по отношению к движению токовой оболочки, формируемой в плазме в результате пробоя на поверхности изолятора. Плотность газа профилируется вдоль поверхности электродов. Чтобы его плотность нарастала в направлении движения оболочки, клапан должен обладать максимальным быстродействием. В нашем случае использована конструкция, аналогичная [7] со временем полного открытия клапана 150 мкс и длительностью полного цикла работы 600 мкс. Высокая скорость открытия обеспечена предварительным разгоном запорного элемента до образования кольцевой щели для истечения газа из подклапанного объема.

3. РАСЧЕТЫ

Для моделирования истечения газа из-под клапана применен решатель rimpleCentralDyM-Foam [8] пакета OpenFOAM для расчета в областях с подвижными сетками. Сетка, использованная для моделирования истечения газа из-под клапана, содержала 6000 ячеек. В основу расчетов положены экспериментально полученные данные по динамике открывания клапана. Для расчетов растекания потоков газа по электродам использовался вычислительный кластер К-60 (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), содержащий до 112 процессорных ядер.

Расчет истечения газа в вакуумированную камеру показал, что малоплотный сверхзвуковой

фронт быстро (за время $\Delta t \sim 100$ мкс) проходит вдоль электродов до изолятора, перекрывающего сечение межэлектродного зазора. Поэтому здесь начинается накопление газа. Возникает волна с обратным градиентом плотности, двигающаяся навстречу газовому потоку. Пример результатов такого расчета показан на рис. 2.

В этих условиях обеспечить азимутальную симметрию первичного электрического пробоя и образования ТПО практически не удастся. В реальных экспериментах при инжекции газа в вакуумированную камеру и разрядных токах до 700 кА нейтронный выход Y_n не превышал 5×10^8 нейтронов за импульс. В режиме стационарного напуска газа выход $Y_n \approx 5 \times 10^9$, а в комбинированном режиме заполнения камеры (стационарное давление рабочего газа $P \leq 1$ Торр совместно с импульсной инжекцией) нейтронный выход достигал значения $Y_n = (1.2-1.3) \times 10^{10}$ нейтронов за импульс [9].

Для реализации заявленной цели работы проведена серия расчетов для инжекции дейтериевой струи в камеру ПФ, предварительно заполненную инертным газом. При этом в условии задачи входила идентификация сорта газа и распределения полной плотности газа по заполняемому межэлектродному объему. На рис. 3а показан результат расчета распределения газа для предварительного заполнения ксеноном. Конфигурация катода несколько упрощена. Графики рис. 3б соответствуют изменению плотности и относительного содержания дейтерия по радиусу камеры вдоль линии, нанесенной на рис. 3а. В данном примере начальная температура в камере составляла 300 К, начальное давление ксенона в камере

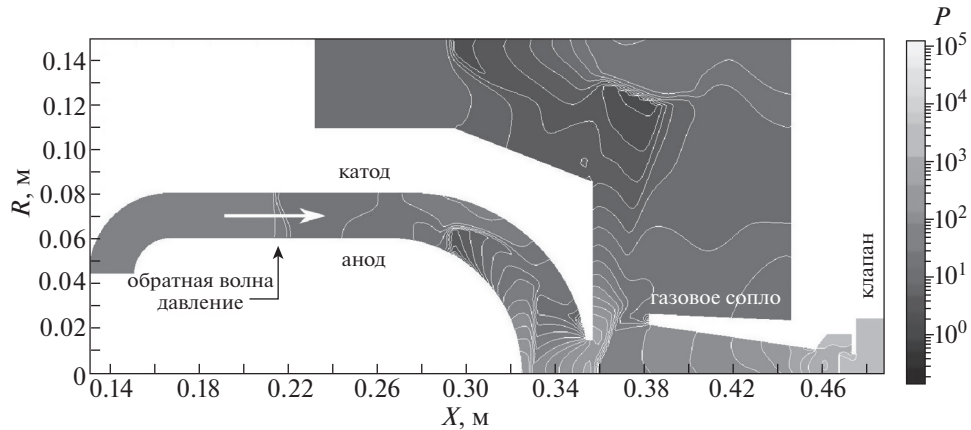


Рис. 2. Пример расчета давления (Pa) газа при импульсном заполнении межэлектродного зазора предварительно вакуумированной камеры ПФ. Приведены размеры электродов на осях в метрах, момент времени $t = 260$ мкс от начала инжекции газа (дейтерий), давление под клапаном 8 бар.

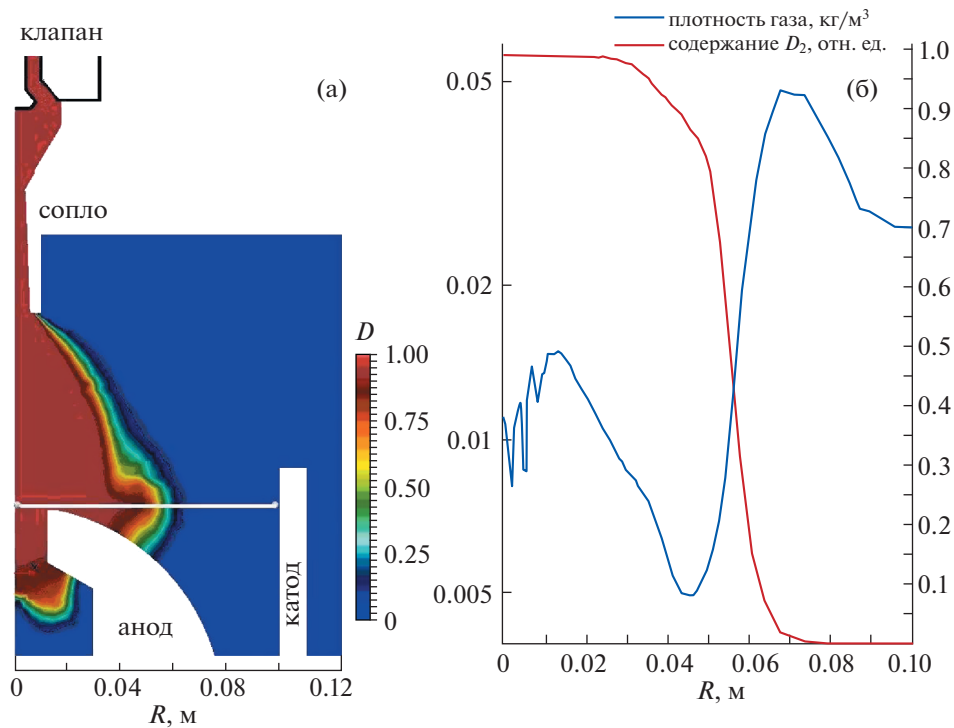


Рис. 3. а) – Распределения массовой доли дейтерия в двумерном сечении камеры ПФ; б) – график полной плотности газа в направлении, перпендикулярном оси камеры около вершины анода, и относительное содержание дейтерия. Момент времени $t = 250$ мкс от начала открытия клапана.

– 0.11 Торр (15 Па), плотность газа – 0.0008 кг/м^3 , давление дейтерия под клапаном – 40 бар. Используются следующие термодинамические параметры газов: для дейтерия D_2 – теплоемкость $C_p = 7249 \text{ Дж/(кг К)}$, удельная масса $m = 4.0282 \text{ г/моль}$; для ксенона Xe – $C_p = 158 \text{ Дж/(кг К)}$, $m = 131.293 \text{ г/моль}$. Отметим, что переходная об-

ласть, разделяющая два сорта газа, имеет протяженность около 1.5 см и не превышает значительно толщину токовой оболочки, ранее оцениваемую в экспериментах [9, 10] около 1.3 см. Дальнейший расчет показывает, что дейтерий соприкасается со стенкой катода после момента времени 450 мкс.

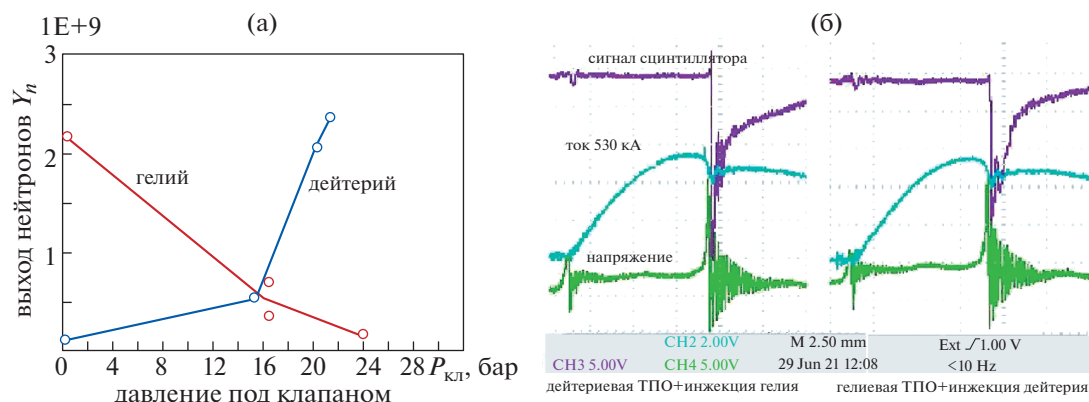


Рис. 4. а) – нейтронный выход Y_n в серии пусков с двумя газами при изменении давления в подклапанном объеме. Обозначен инжектированный газ, ТПО из газа другого типа; б) – сравнение осциллограмм напряжения и тока в разряде ПФ с гелиевой (слева) и с дейтериевой ТПО.

Аналогичные вычисления проведены для случая с начальным заполнением камеры гелием. Конфигурация газового распределения гелия, аналогична показанной на рис. 3, получена при начальном давлении 0.3 Торр и давлении $P_{\text{кл}}$ дейтерия под клапаном 8 бар в момент времени 175 мкс после начала открытия клапана. Эти данные использованы в качестве исходной точки для описанных ниже реальных экспериментов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Выполненные расчеты позволили надеяться на возможность экспериментальной проверки работоспособности принятой концепции на сравнительно слаботочной установке ПФ-МОЛ. Факт генерации нейтронов при обжатии гелиевой оболочкой был установлен ранее экспериментально и доложен в [11]. Представленная ниже сравнительная серия экспериментов проведена практически в непрерывном режиме во избежание нарушения настройки синхронизации и работы систем установки. Для повышения воспроизводимости данных использовался режим пониженной зарядки емкостного источника до напряжения 11 кВ при токе до 600 кА. Задержка включения тока равна интервалу 190 мкс после начала открытия клапана. Основным фактором оценки результата экспериментов являлся нейтронный выход Y_n при изменении в широких пределах давления дейтерия под клапаном. Камера стационарно заполнялась гелием при давлении 0.35 Торр. На рис. 4а показана диаграмма зависимости нейтронного выхода Y_n от давления дейтерия под клапаном. Виден резкий рост выхода нейтронов, обусловленный увеличением содержания дейтерия в сжатой области пинча. В данной ситуации трудно судить о структуре ТПО,

приходящей в зону кумуляции, что должно быть предметом дальнейших исследований.

Поэтому для сравнения выполнена контрольная серия экспериментов с обращенной конфигурацией газов: дейтериевой ТПО обжимался инжектированный гелий. Полученные данные также отражены на рис. 4а. При идентичных начальных плотностях газов все электротехнические параметры сохранены, что подтверждено сравнением вольтамперных характеристик разрядов, показанных на рис. 4б. Приведенные осциллограммы отличаются только формой сигнала сцинтиляционного датчика, который кроме нейтронов регистрирует импульс рентгеновского излучения. Он сильнее выражен при кумуляции гелиевой плазмы. При сжатии гелия дейтериевой ТПО с повышением давления гелия под клапаном до $P_{\text{кл}} = 24$ бар выход нейтронов снизился практически до фонового уровня. Можно предположить, что в данном случае отсутствует заметное содержание дейтерия в пинче.

5. ВЫВОДЫ

С помощью примененных вычислительных методов и разработанной методики освоена процедура проведения детальных расчетов процессов импульсного заполнения электроразрядных камер ПФ рабочим газом. Выявлена особенность этого процесса в виде образования отраженной волны накопления плотности при инъекции газа в вакуумную камеру ПФ, существенно влияющая на условия образования ТПО. Рассчитаны распределение плотностей при комбинированном способе заполнения камеры и педение их во времени. При использовании различных газов для стационарного заполнения и импульсной инъекции определена ширина границы перемешивания, которая не превышает толщины ТПО

1.5–2.0 см в большинстве экспериментов. Проведены опыты с генерацией нейтронов в дейтериевом пинче, обжимаемом гелиевой ТПО. Из полученных результатов следует, что заметное количество примеси гелия в составе дейтериевого пинча отсутствует. Обоснована перспективность такого комбинированного способа заполнения камеры ПФ с использованием ксенона на установках с большими токами свыше 2–3 МА. При этом возможность сохранения достаточно низкой плотности газа у изолятора позволит организовать начальную стадию пробоя и образования ТПО с хорошей аксиальной симметрией. Расчет начальных условий разряда особенно важен для работ, проводимых на крупных установках, с большими разрядными токами (более 2 МА), эксперименты на которых достаточно дорогие, в отличие от приведенного выше примера установки с максимальным запасом энергии до 100 кДж.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов Н.В. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. № 1. С. 25.
2. Вихрев В.В., Брагинский С.И. // Вопросы теории плазмы. М.: Атомиздат, 1980. Т. 10. С. 243.
3. Кис В., Деккер Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 20. С. 5.
4. Jacek Stanislawski, Jaroslaw Baranovski et al. // Nukleonika. 2001. V. 46. С. 73.
5. Войтенко Д.А., Ананьев С.С., Астапенко Г.И., Басулая А.Д., Марколия А.И., Митрофанов К.Н., Мяслон В.В., Тимошенко А.П., Харрасов А.М., Крауз В.И. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 12. С. 967.
6. Kubes P., Paduch M., Cikhardt J., Cikhardtova B., Rezac K., Klir D., Kravarik J., Kortanek J., Zielińska E. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. P. 062705.
7. Аретов Г.Н., Васильев В.И., Хамидуллин Ф.Р. // ПТЭ. 1972. № 3. С. 219.
8. Kraposhin M., Bovtrikova A., Strijhak S. // Procedia Computer Science. 2015. V. 66. P. 43.
9. Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Крылов М.К., Ефремов М.Н., Ильичева М.В., Лотоцкий А.П., Лаухин Я.Н., Сулимин Ю.Н., Панфилов Д.Г., Предкова Е.И., Шишлов А.О., Хомутильников Г.Н., Фролов А.Ю., Додулад Э.И., Школьников Э.Я., Вихрев В.В., Лукин В.В. // ВАНТ. Сер.Термоядерный синтез. 2022. Т. 45. Вып. 1. С. 119.
10. Крауз В.И. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Тематический Т. IX-2. Высокоэнергетичная плазмодинамика. М.: ЯНУС-К, 2007. С. 152.
11. Лотоцкий А.П., Грабовский Е.В., Вихрев В.В., Додулад Э.И., Крылов М.К., Ефремов Н.М., Сулимин Ю.Н., Шишлов А.О., Предкова Е.И., Фролов А.Ю., Лукин В.В. // XLVII Межд. Звенигородская конф. по физике плазмы / Сб. тез. докл. М., Звенигород, 2020. С. 113.