

ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС. ВОСПОМИНАНИЯ О БУДУЩЕМ

Н. Н. ПЕТРОВ

В широко известном в 1960-х гг. фильме «Девять дней одного года» действие разворачивается вокруг установки, на которую разряжается мощная конденсаторная батарея. Гром разрядов, пляшущие осциллограммы, сыплющиеся нейтроны... Реальными прототипами главных героев фильма были супруги Филипповы из ИАЭ им. Курчатова, а прототипом установки — их камера «Плазменный фокус».

В 1954 г. Н. В. Филиппов, исследуя мощные сильноточные разряды типа z -пинч со сжатием канала газового разряда под действием сил собственного магнитного поля, с которыми связывали тогда большие надежды на получение импульсной термоядерной реакции, попытался преодолеть недостатки z -пинчей, перейдя к плоской металлической разрядной камере (рис. 1). После подачи от конденсаторной батареи 1 через разрядник 2 напряжения на катод 3 происходит пробой рабочего газа по поверхности изолятора 4, где и образуется поверхность 5 разрядного токового слоя. Давлением магнитного поля, сосредоточенного внутри изолятора, этот токовый слой отрывается от изолятора и ускоряется вдоль стенок 6 камеры, а затем токовая оболочка сходится к оси. Около оси создается небольшая область плотной плазмы 7 воронкообразной конической формы, которая является источником импульсного нейтронного излучения. Эта область получила название «плазменного фокуса», а заодно так стала называться и вся камера.

После откачки воздуха и заполнения камеры рабочим газом (дейтерием, водородом, дейтериево-третиевой смесью) проводится серия так называемых тренировочных разрядов, при которых жестких излучений (рентген, нейтроны) из области 7 не наблюдается. Это нужно для удаления примесей воздуха из поверхностных слоев электродов и насыщения их рабочим газом, напыления металлической пленки на изолятор и анод. С ростом числа разрядов каждая установ-

ка проходит три стадии, сменяющие друг друга через несколько сотен пусков. Сначала осуществляется режим с одним сжатием плазмы в области 7 с одной мощной вспышкой нейтронного излучения. Затем следует режим с двумя сжатиями, когда наблюдаются две начальные сравнительно малоинтенсивные вспышки нейтронного и рентгеновского излучений, а в основной вспышке их интенсивность возрастает в несколько раз. Когда толщина напыленного на анод металла, насыщенного рабочим газом, достигает десятков микрон, наступает режим с генерацией рентгеновского и высокоинтенсивного нейтронного излучения. В 1961 г. аналогичные явления наблюдались Дж. Мейзером в цилиндрических коаксиальных плазменных инжекторах.

Благодаря нецилиндрической форме радиальной кумуляции сжатие плазмы в зоне плазменного фокуса оказалось существенно более устойчивым, а концентрация энергии на конечной стадии заметно выше, чем в z -пинчах, что и привело к значительному росту нейтронного излучения. Результаты исследований были настолько впечатляющими, что стимулировали развитие международного сотрудничества, в том числе и создание объединенной европейской программы по плазменному фокусу. Однако генерация одновременно с нейтронами рентгеновского излучения, аналогичного наблюдавшемуся ранее в z -пинчах, уже с первых опытов позволяла делать вывод о нетепловом происхождении нейтронов и бесперспективности плазменного фокуса с точки зрения нагрева плазмы до термоядерных температур.

Тем не менее, камеры «Плазменный фокус» интенсивно изучались в СССР и за рубежом. В 1959 г. во ВНИИЭФ под руководством будущего академика А. И. Павловского был проведен опыт с камерой Филиппова, запитываемой от взрывного магнитокумулятивного генератора. Это решение являлось довольно легкомысленным, поскольку никакого опыта работы с плазменным

фокусом до этого во ВНИИЭФ не имелось. Когда ни одного нейтрона не получили, приняли мудрое решение: исследовать сначала работу камеры с питанием от конденсаторной батареи.

Это поручили лаборатории Е. Н. Смирнова. Была построена батарея с энергией до 200 кДж и напряжением до 50 кВ. Начались эксперименты. Но что-то новое удалось получить только в 1965 г., когда была предложена комбинированная камера (анод в камере Филиппова удлинили на 200-300 мм). В результате исчезла необходимость в длительной тренировке камеры, нейтронное излучение возросло в 10–20 раз и в отдельных опытах достигло $(3-5) \cdot 10^{10}$ нейтронов за импульс.

В 1966–1968 гг. была проведена оптимизация конструкции камеры, разработаны и исследованы конструкции двухконтурных камер цилиндрического и радиального типов, проведены исследования работы камеры на смеси дейтерия с тритием в широких диапазонах давления, их концентрации и разрядного тока. Максимальное увеличение выхода нейтронов (до 70 раз) имело место при равных концентрациях дейтерия и трития.

При токе 1,3 МА выход нейтронов составил $2 \cdot 10^{12}$ нейтронов за импульс. В этом диапазоне зависимость выхода от тока хорошо описывалась выражением $N = 2 \cdot 10^{12} (I/I_0)^5$, где $I_0 = 1,3$ МА. Для дальнейшей проверки этой зависимости при токах, увеличенных до ~ 3 МА, по инициативе А. И. Павловского были построены под руководством Е. Н. Смирнова 30-киловольтные конденсаторные батареи МКБ-1 на энергию 1 МДж и МКБ-2 — на 2,7 МДж и изготовлена крупногабаритная камера (диаметры анода — 0,8 м, катода — 1 м), с которой и начали опыты на батарее МКБ-1.

Кроме того, для исследования возможности работы камеры в области высоких давлений (по-

рядка атмосферного) были начаты исследования по формированию симметричных плазменных оболочек с помощью электрического взрыва лайнеров из алюминиевой фольги или тонких вольфрамовых проволочек (50–100 микрон).

Уже в самом начале работ на мегаджоульном плазменном фокусе возникли серьезные проблемы с механической прочностью изолятора и согласованием электротехнических параметров фокуса и батареи. Генерация нейтронов наблюдалась лишь в области низких давлений (0,1–0,5 тор). При увеличении тока обнаружилось отклонение выхода нейтронов от предсказываемого формулой зависимости от величины тока.

Поэтому для дальнейших исследований был создан новый экспериментальный комплекс на основе 35-киловольтной батареи энергоемкостью около 400 кДж и использованы модифицированные камеры Мейзера с сетчатыми трубчатыми катодами (прозрачность $\sim 50\%$), сделанными из нержавеющей стали с толщиной стенки 10 мм [1].

Камера типа РК-200 с наружным диаметром 200 мм имела анод диаметром 120 мм, длиной 140 мм. Катод был сделан из перфорированной трубы с внутренним диаметром 160 мм. Изолятор — из полиэтилена, цилиндрическая часть которого была защищена от контакта с плазмой керамической вставкой длиной 120 мм. Аналогичная камера РК-450 имела наружный диаметр 450 мм, диаметр анода 200 мм, длину анода 190 мм, диаметр катода 310 мм.

С этими камерами были проведены исследования при токах 1,4–2,1 МА, давлении дейтерия 1–10 тор и энергетике 100–400 кДж. Максимальный выход нейтронов $2 \cdot 10^{11}$ за импульс получен в РК-200 при токе 2,1 МА и давлении дейтерия 6 тор. В исследованном диапазоне токов выход нейтронов был пропорционален $0,5 \cdot 10^{11} I^4$

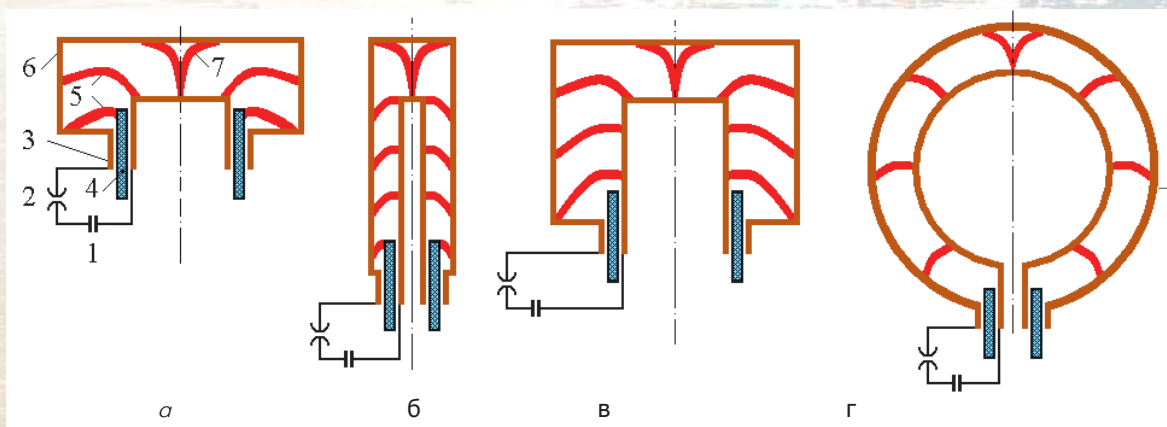


Рис. 7. Схемы установки плазменного фокуса: а — схема Н. В. Филиппова; б — Дж. Мейзера; в — комбинированная схема; г — схема Н. Г. Макеева

(ток в МА), он также удовлетворительно описывался и зависимостью $0,25 \cdot 10^{10} I^5$. Наибольший вклад в эти исследования внесли Е. Н. Смирнов, Е. Ф. Жолобов, Н. Н. Петров, В. Н. Суворов, Г. В. Карпов, Б. Г. Птицын.

Исследования этих камер продолжались до 1979 г. Но затем в исследованиях плазменного фокуса наступил спад, возникла идеологическая неопределенность, и в 1982 г. лаборатория Е. Н. Смирнова была расформирована.

В 1964 г. в физическом отделении ВНИИЭФ (ныне ИЯРФ) В. А. Цукерманом и Н. Г. Макеевым началась разработка компактных сферических камер плазменного фокуса. В 1972 г. были созданы отпаянные камеры (типа СФК-5). Они имели стабильные выходные характеристики при небольших массогабаритных параметрах. На дейтериево-тритиевой (D-T) смеси при энергии питания 30 кДж камеры позволили получить импульс нейтронов $\sim 10^{12}$ длительностью 25 нс. Они широко применялись в экспериментах как импульсные источники быстрых нейтронов, рентгеновского излучения и высокоскоростных плазменных струй для активационного анализа, для нейтронографии, для формирования дефектов в полупроводниках и т.п.

В 1966 г. проведены первые опыты по запитке камер Н. Г. Макеева от компактного магнитокумулятивного генератора, разработанного в подразделении В. К. Чернышева. В 1975 г. при импульсе тока с амплитудой 1,2 МА с фронтом нарастания ~ 1 мкс в камере с D-T смесью получено $\sim 10^{12}$ нейтронов в импульсе длительностью ~ 50 нс. На основе этих опытов разработаны компактные автономные источники нейтронов для исследования

работоспособности различных устройств при воздействии внешнего нейтронного излучения. За разработку таких источников в 1980 г. сотрудники ВНИИЭФ Н. Г. Макеев, Г. Н. Черемухин, В. К. Чернышев, В. А. Демидов, А. Д. Демидов, Г. И. Волков, А. Е. Телегин, Г. В. Табаков были удостоены Государственной премии.

Программа общеевропейских исследований («Объединенная европейская программа исследований плазменного фокуса») начала 1970-х гг. была принята на фоне успехов, достигнутых на установках первого поколения. Цель программы состояла в том, чтобы проверить, сохраняется ли без изменения зависимость выхода нейтронов от тока вплоть до максимально осуществимых энергий (токов), и лучше понять природу основных явлений, ответственных за генерацию нейтронного излучения. В рамках программы были созданы крупномасштабные установки во Франции (Лимейл), с энергетикой 340 кДж, Германии (Штутгарт, установка «Посейдон»), с энергетикой 500 кДж, Италии (Фраскатти) — 1 МДж. В США создали установку с батареей на 720 кДж. В начале работы над программой во Фраскатти возникли неожиданные затруднения, однако работа продвигалась успешно, и был получен выход нейтронов около 10^{12} при 560 кДж, который сопоставим с рекордным выходом D-D нейтронов $2,5 \cdot 10^{12}$, достигнутым в США (Лос-Аламос) при энергетике 400 кДж. Во Фраскатти использовалась гибридная камера Филиппова—Мейзера, а в Лос-Аламосе — классическая камера Мейзера [2]. Ожидалось, что при энергии конденсаторной батареи ~ 1 МДж выход D-D нейтронов достигнет 10^{13} нейтронов за импульс.

До настоящего времени продолжает действовать установка ПФ-1000 в Варшаве (рис. 2). Это наиболее крупная в мире установка плазменного фокуса: объем разрядной камеры 4 м³, диаметры анода 23 см, катода — 52 см. При необходимости внутри камеры может поместиться человек для проведения наладочных работ (рис. 3). К сожалению, энергетика невелика — всего ~ 1 МДж, ток 2 МА, поэтому выход нейтронов всего $1,1 \cdot 10^{11}$ на D-D реакции. Работает также установка КПФ-4 — ФЕНИКС в Сухуми (Абхазия) с диаметром анода 18 см, катода — 30 см, с энергетикой ~ 1 МДж, током 2–2,5 МА, дающая $\sim 10^{11}$ нейтронов за импульс.

В экспериментах на установках плазменного фокуса мегаджоульного диапазона обнаружилось неприятное изменение зависимости выхода нейтронов от тока: рост выхода был существенно меньшим, чем это ожидалось. К тому же было

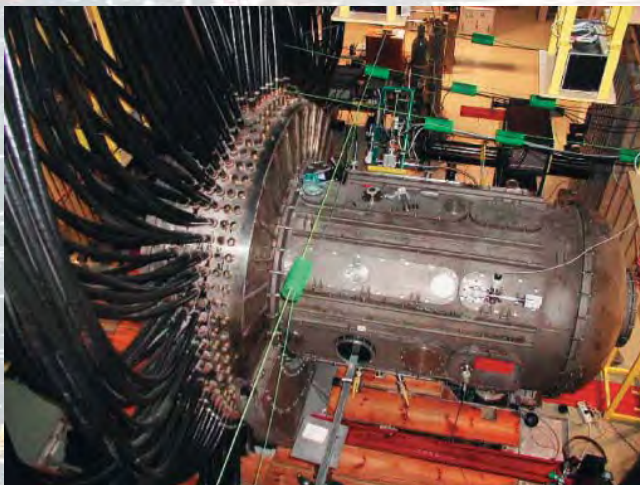


Рис. 2. Самая крупногабаритная в мире установка плазменного фокуса создана в Варшаве



Рис. 3. В варшавскую камеру при необходимости может поместиться человек

экспериментально доказано, что подавляющая часть нейтронов имеет ускорительную природу, т.е. реакции термоядерного синтеза $D+D$ и $D+T$ обусловлены не температурой, а взаимодействием с плазмой пучков ускоренных ионов D и T . Такие нейтроны назвали ускорительными. Генерируются они из областей разряда, которые не совпадают с зонами перетяжки плазменного шнура.

Те нейтроны, выход которых в результате термоядерных реакций обусловлен высокой температурой, назвали тепловыми, или термоядерными. В экспериментах их доля составляла всего $\sim 10^{-3}$ – 10^{-4} от общего числа нейтронов. Термоядерные нейтроны генерируются в фазе максимального сжатия и только на установках с большими токами и временами нарастания тока. Генерация ускорительных нейтронов наблюдалась, как правило, в нестабильной фазе разряда, возникающей после развития перетяжки. Однако в короткоимпульсных высоковольтных (до ~ 300 кВ) установках с большой скоростью нарастания тока ($\sim 10^{13}$ ампер в секунду) — установка SPEED-2 в Германии — и в установках с большой энергетикой (установка во Фраскатти, установка «Посейдон») нейтроны возникали и до развития перетяжки в фазе радиального сжатия, причем с ростом тока доля термоядерных нейтронов и длительность их генерации в этой фазе возрастала.

Механизмы ускорения нейтронов в плазменном фокусе пока недостаточно ясны. Предполагается, что в фазе радиального сжатия дейтроны

ускоряются при их отражении от плазменной оболочки (механизм ускорения Ферми), а их пробеги в плазме увеличиваются в несколько раз из-за ларморовского движения дейтронов. В нестабильной фазе ускорение дейтронов связывается с развитием аномального сопротивления. Высокая эффективность генерации нейтронов в ускорительных режимах определяется тем, что основная часть ускоренных дейтронов имеет энергию 100–150 кэВ, оптимальную для $D-D$ и $D-T$ реакций, к тому же и их пробег в плазменной мишени возрастает из-за ларморовского вращения.

При выходах $D-D$ нейтронов до 10^{12} за импульс зависимость выхода от тока удовлетворительно описывается выражением $N = 10^{10}I^4$, где ток I выражен в мегаамперах. При сохранении этой зависимости до токов ~ 100 МА выходы должны составить $\sim 10^{18}$ – 10^{20} нейтронов за импульс. Расчетами сотрудников ИАЭ им. Курчатова было показано, что такая зависимость от тока должна сохраняться с его увеличением, по крайней мере, до 100 МА. Но в опытах с плазменным фокусом с выходом $\sim 10^{13}$ нейтронов уже наблюдались заметные отклонения от этой зависимости: выходы были существенно ниже.

Поскольку опыты с еще более сильноточным плазменным фокусом не проводились, то для оценки предельных значений нейтронного выхода можно использовать расчеты А. Бирнбойма [3] для модели взаимодействия пучка ионов дейтерия с плазменной мишенью, где нейтроны — также ускорительные. Согласно этим расчетам, при энергии ионов 120 кэВ пучок с энергетикой ~ 500 кДж при взаимодействии с плазменной короной твердотельной тритиевой мишени генерирует $\sim 10^{17}$ нейтронов. Это более реалистичные оценки, так как по зависимости для плазменного фокуса должно быть на 3–4 порядка больше.

Однако эксперименты показали, что в плазменном фокусе часть ускорительных нейтронов с увеличением тока заменяется термоядерными, поскольку в приосевой зоне хорошо работающий при низких плотностях и температуре плазменной мишени ускорительный механизм переходит в тепловой (термоядерный), а максимальный выход ускорительных нейтронов в обычном плазменном фокусе — заметно меньше 10^{17} . При тепловом механизме заметно возрастает объем области генерации, длительность нейтронного импульса и, соответственно, время жизни термоядерной плазмы, а зависимость выхода нейтронов от тока для теплового механизма равновесного пинча остается пропорцио-

нальной четвертой степени тока и сохраняется с увеличением тока.

Так есть ли будущее у плазменного фокуса? Основные отличия плазменного фокуса от прямых z-пинчей заключаются в более высокой устойчивости сжатия, благодаря его нецилиндричности и возможности синхронизации старта радиальной кумуляции в максимуме тока. В настоящее время в z-пинчах на основе многопроволочных лайнеров эти условия реализованы. Однако многопроволочные пинчи требуют высокого вакуума, и нагрев D-D или D-T смеси возможен только в режиме конверсии энергии оболочки в изотропное рентгеновское излучение. Расчеты нагрева цилиндрической мишени с D-T газом при времени нарастания тока ~ 100 нс, выполненные в РФЯЦ-ВНИИЭФ [4], показали, что для реализации режима зажигания необходима энергия ~ 200 МДж, при этом нейтронный выход составит $\sim 10^{20}$ нейтронов за импульс. Для индуктивности разрядного контура ~ 10 нГн, принятой в этих расчетах, энергия ~ 200 МДж соответствует току ~ 200 МА, при котором, в соответствии с зависимостью нейтронного выхода от тока для термоядерного механизма, нейтронный выход также оказывается близким к 10^{20} . Такой уровень энергий и токов может быть реализован при использовании в качестве энергоисточника магнитокумулятивного генератора и при одновременном увеличении времени нарастания тока до 1–10 мкс, что неприемлемо для прямых z-пинчей, в том числе и для многопроволочных лайнеров, так как при таких временах устойчивая кумуляция экспериментально наблюдается только в плазменном фокусе, одновременно обеспечиваются и более оптимальные условия работы магнитокумулятивного генератора.

Основной недостаток крупномасштабных устройств плазменного фокуса состоит в снижении доли полного тока в области фокуса с ростом энергоемкости установок. На завершающем этапе исследований плазменного фокуса во Фраскати были сформулированы предложения по преодолению выявленных недостатков: необходимость работы при напряжениях свыше 100 кВ, замещение нейтрального газа в коаксиальной части магнитным полем, замена коаксиала индуктивностью, в которой накапливается магнитная энергия и затем в максимуме тока передается в фазу радиальной кумуляции.

Эти рекомендации в полном объеме реализуются в двухконтурных системах плазменного фокуса с импульсной инжекцией плазмы, разработка которых проводилась во ВНИИЭФ. По схеме энерго-

питания такие системы близки к системе МАГО (обжигание замагниченной термоядерной мишени), исследовавшейся в коллективах В. Н. Мохова и В. К. Чернышева. Это значительно упрощает их отработку, учитывая большие достижения в экспериментальных исследованиях системы МАГО с питанием от магнитокумулятивного генератора, часть из которых проводилась во ВНИИЭФ совместно с Лос-Аламоссской лабораторией.

Одной из наиболее сложных проблем пинчей с импульсной инжекцией является согласование по массе инжектируемого газа, так как в зоне радиальной кумуляции необходимо создать плазму с плотностью $\sim 10^{19}$ – 10^{20} см⁻³. Однако эта проблема имеет чисто технический характер, и пути ее решения известны.

В заключение хочется напомнить одно из высказываний академика А. И. Павловского: «Для зажигания термоядерной реакции достаточно обеспечить необходимую концентрацию плотности энергии. Сочетание таких эффективных концентраторов импульсной энергии, как магнитокумулятивный генератор и плазменный фокус, и достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ в разработке сверхмощных дисковых магнитокумулятивных генераторов позволяют надеяться не только на получение высокоинтенсивных потоков нейтронов, но и на зажигание термоядерной реакции».

Литература

1. J.W. Mather, P.J. Bottoms. Characteristics of the dense plasma focus discharge. The Physics of Fluids. 1968. V. 11. N. 3. P. 611.
2. O. Zucker, W. Bostick, et al. The plasma focus as a large fluence neutron source. Nuclear Instrument and Methods. 1977. V.145. P. 185.
3. A. Birnboim, E. Greenspan, D. Sharts. Inertial-confinement ion-beam wet-wood-burner fusion neutron source. Nuclear Fusion. 1979. V.19. N.12.
4. Долголева Г. В., Ермолович В. Ф., Ивановский А. В., Орлов А. П. О перспективах зажигания капсулы с D-T газом при газодинамическом сжатии компактным высокоскоростным плазменным лайнером // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 9. С. 826-829.

ПЕТРОВ Николай Николаевич —
заместитель начальника отдела НТЦФ
РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физ.-мат. наук,
лауреат Государственной премии