

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ВВОДЕ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА В РЕЖИМ

В.А. Грибков, А.В. Дубровский, Н.В. Калачев, О.Н. Крохин,
В.И. Михайлов, В.Я. Никулин

Методами магнитных зондов и скоростной кадровой интерферометрии показано, что так называемая тренировочная серия разрядов установки "Плазменный фокус" состоит в перераспределении тока между фронтом ударной волны и скин-слоем токово-плазменной оболочки. При этом вследствие отжига и распыления материала электродов и изолятора процесс концентрации тока заменяется процессом пинчевания плазмы.

При создании новой установки типа плазменный фокус (ПФ), а также после развакуумирования камеры ПФ на длительный срок на этих устройствах приходится проводить тренировочную серию от нескольких десятков до сотен разрядов. Только после этого в ПФ появляются жесткие излучения (рентген, нейтроны и т. д.). Представляет интерес исследование физических процессов, протекающих в ПФ в течение серии тренировочных разрядов.

Стадия ввода установки ПФ в эксплуатацию на номинальном уровне рабочих параметров характеризуется выделением абсорбированных внутренними стенками разрядной камеры газов и распылением на аноде и изоляторе металла (материала электродов), происходящим в атмосфере дейтерия. Требуется получить ответы на следующие вопросы: Каков состав распыленных на аноде и изоляторе веществ, какова их структура и свойства, а также каково влияние этого напыленного покрытия на основные процессы ПФ? Какова роль примесных газов в формировании разряда и почему отсутствует в тренировочной серии выход жестких излучений?

Среди возможных причин обсуждаются следующие — нет пинча, нет симметричной начальной стадии, малая плотность пинча, пинч сильно охлаждается за счет излучения на примесях, нет обрыва тока.

Для ответа на поставленные вопросы необходимы материаловедческие исследования, а также изучение динамики разряда во время этой тренировочной серии, что до сих пор не проводилось. В данной работе изложены результаты исследования разряда в течение периода его ввода в режим. Для этой цели был применен диагностический комплекс, содержащий: магнитно-зондовую методику; телеинтерферометрию; спектроскопию в видимой области спектра; камеру-обскуру в области мягкого рентгеновского излучения; набор фотоумножителей для регистрации мягкого и жесткого рентгеновского излучения; нейтронный счетчик; регистрацию производной полного тока через камеру; измерение давления рабочего газа до и после разряда.

Совокупное использование данных методик демонстрирует следующее изменение контролировавшихся параметров разряда по мере ввода камеры в рабочий режим. В первых выстрелах давление газа в камере после каждого разряда повышается на 10 — 20% и растет толщина распыляемой на поверхности изолятора и анода пленки. При этом нет выхода нейтронов и жесткого рентгеновского излучения, на камере-обскуре не получаются фотографии каких-либо светящихся в мягком рентгеновском излучении плазменных образований, зонды регистрируют сначала одиночные, а затем и двойные импульсы dV/dt , свидетельствующие о наличии одной или двух зон протекания тока, причем в случае двойного, амплитуда первого импульса больше, чем у второго (рис. 1а). Телеинтерферометрия (рис. 1а) показывает, что через 5,5 мкс после поджига разрядника в центре камеры наблюдается подобие пинча с весьма низкой плотностью. Так называемая "особенность" на осциллограммах dI/dt отсутствует, что говорит об отсутствии обрыва тока.

В дальнейшем, через несколько десятков разрядов появляется и начинает расти особенность на производной тока, время схождения тока на ось камеры постепенно уменьшается до 4 мкс, пинчки на осциллограммах с магнитного зонда становятся регулярно двойными, причем сначала оба пинча сравниваются по амплитуде (рис. 1б), а затем второй импульс начинает превышать первый (рис. 1в). На оси, как показывает телеинтерферометрия, формируется пинч (рис. 1б), плотность и симметрия которого постепенно увели-

чиваются (рис. 1в) от выстрела к выстрелу. Появляется и нарастает выход жесткого рентгеновского и нейтронного излучений. Зависимость относительной высоты двух пиков на осциллограммах сигналов с магнитных зондов от нейтронного выхода установки приведена на рис. 2 а, б (рис. 2а представляет 2 варианта).

За время тренировочной серии толщина напыленного слоя на аноде увеличивается до нескольких десятков микрон, а измерение поверхностного сопротивления изолятора с напылением показало, что оно на три порядка величины меньше сопротивления чистой поверхности фарфора.

Аналогичные процессы (только за гораздо более короткую тренировочную серию) протекают и при введении ПФ в режим после развакуумирования.

На основании зондовых и интерферометрических измерений можно представить следующую картину физических процессов, протекающих во время тренировочной серии разрядов.

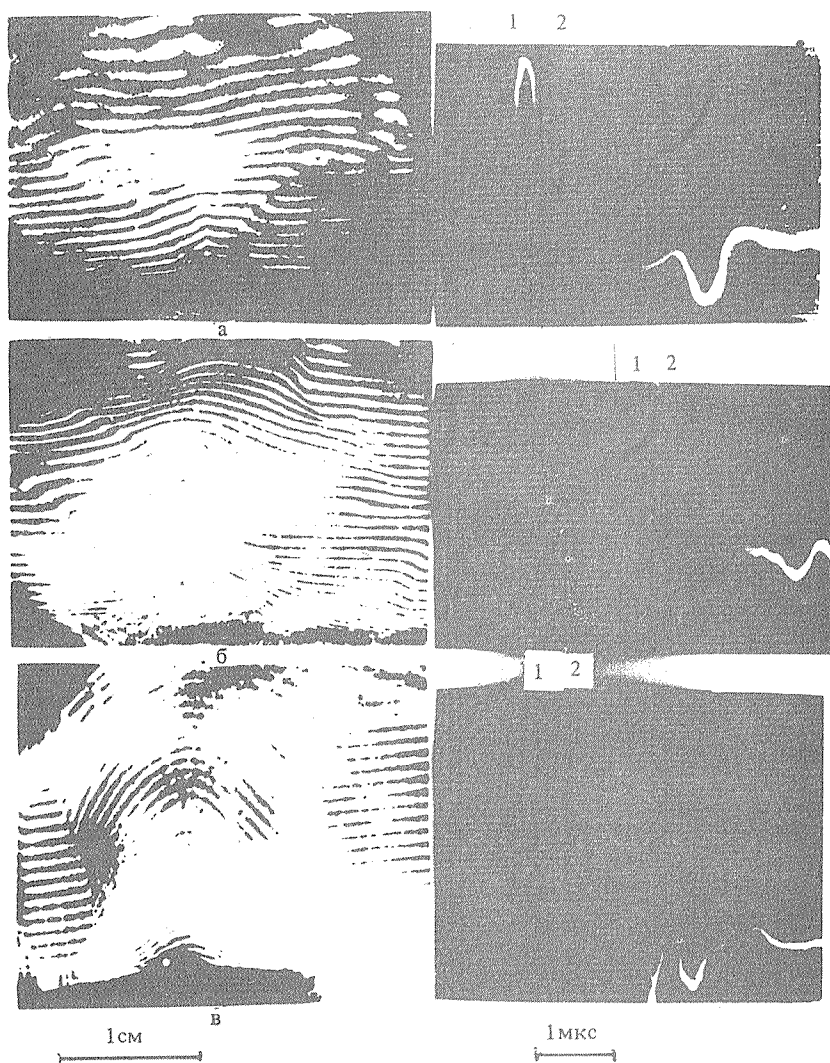


Рис. 1. Осциллограммы dV/dt и интерферограммы в первых выстрелах (а), в середине (б) и в конце (в) тренировочной серии.

После сборки новой камеры в первых разрядах пробой оказывается несимметричным, причем часто не вдоль изолятора, а непосредственно с анода через газ на лайнер. При этом отсутствует сгребание газа к оси и, в сущности, процесс представляет собой схождение ионизационных волн с контракцией вблизи оси относительно небольшой части тока, тогда как основная его часть протекает по плотной слабоионизованной плазме, заполнявшей камеру. Таким образом, отсутствие выхода жестких излучений объясняется, во-первых, тем, что не реализуются условия, необходимые для обрыва тока (не достигается высокое значение его плотности и, следовательно, превышение дрейфовой скорости над ионно-звуковой), и, во-вторых, низкой плотностью плазмы вблизи оси камеры (отсутствие плотной горячей "мишени").

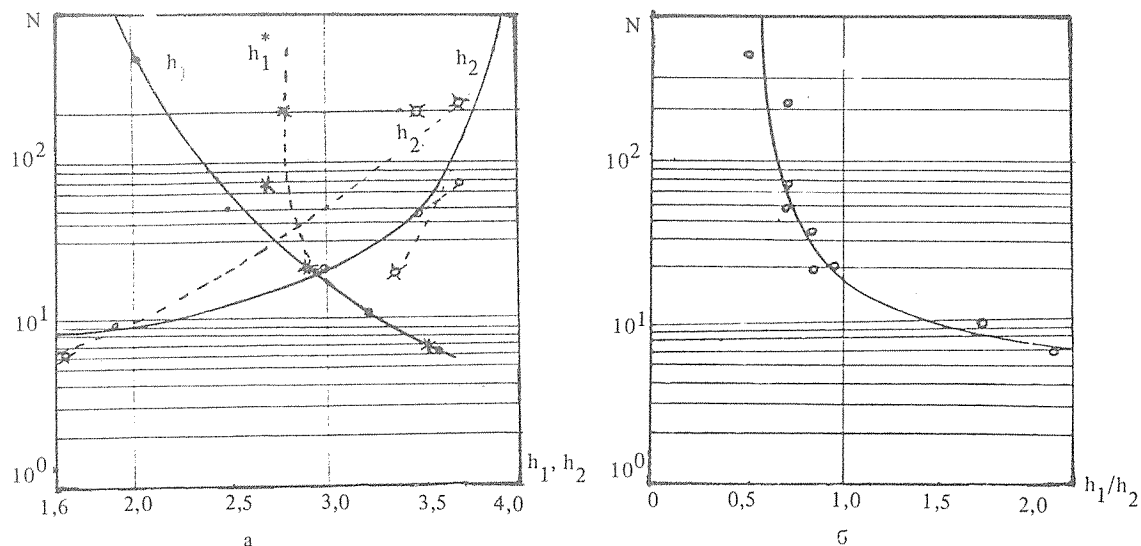


Рис. 2. Кривые зависимостей нейтронного выхода ПФ от амплитуд первого и второго импульсов на осциллограмме $\partial V/\partial t$ (а) (представлены два варианта) и от их отношения (б).

По мере увеличения количества тренировочных выстрелов происходит распыление материала катода на поверхности анода и изолятора, что приводит к симметризации начальных условий в камере, к понижению (выравниванию) электрического потенциала вдоль поверхности изолятора и к облегчению ионизации в месте контакта токовой оболочки с электродами /1/. Как следствие этих причин, пробой становится более симметричным, происходит вдоль поверхности изолятора, и после отрыва токово-плазменной оболочки (ТПО) от изолятора последняя возбуждает в рабочем газе ударную волну (УВ), во фронте которой происходит ионизация. Ток в этом случае протекает в двух зонах — во фронте УВ (первый пик на осциллограмме $\partial V/\partial t$) и в ТПО (второй пик). По мере обезгаживания камеры и очистки ее от примесей тренировочными разрядами падает омическое сопротивление плазмы в ТПО и все большая часть тока начинает протекать по ней, а не во фронте УВ (уменьшение первого пика $\partial V/\partial t$ и увеличение второго). Благодаря этому повышается эффективность сгребания плазмы к оси, уменьшается "потеря тока" /1, 2/, что, наряду с возрастанием степени симметрии разряда, приводит к более высокой плотности плазмы пинча и реализации условий, необходимых для "обрыва тока" /3/. Повышению плотности и обрыву тока способствует также уменьшение прогрева плазмы пинча перед сжатием ее на оси за счет уменьшения доли тока, протекающего по УВ и выходящего на геометрическую ось камеры в период, предшествующий пинчеванию. Все эти факторы способствуют появлению и, в дальнейшем, нарастанию выхода жестких излучений в ПФ.

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. ПФ филипповского типа входит в режим медленнее, чем ПФ мейзеровского типа в силу большей площади внутренней поверхности камеры.
2. Учитывая, что эта площадь растет пропорционально корню квадратному из энергии батареи, установки с большой энергетикой будут входить в режим быстрее, чем современные.
3. Отсутствие выхода жестких излучений в начальный период обусловлено тремя причинами: отсутствием симметричного пробоя по изолятору, отсутствием эффективного сгребания плазмы к оси и потерями тока, отсутствием условий, необходимых для обрыва тока в ПФ.
4. Для выяснения причин отсутствия сгребания плазмы токовой оболочкой к оси в течение тренировочного периода необходимы исследования приэлектродных процессов, в частности, состава, структуры и свойств распыленного на аноде и изоляторе материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грибков В. А. и др. Труды 2-го Международного совещания по плазменному фокусу и сопутствующим явлениям, М., изд. ФИАН, 1983.
2. Orrenlander T. Preprint Centro di Frascati N 78.6, Rome, Italy, 1978.
3. Грибков В. А., Крохин О. Н. Препринт ФИАН № 57, М., 1981.

Поступила в редакцию 31 марта 1989 г.