

УДК 537.523

## ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ И ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМОФОКУСНОМ РАЗРЯДЕ

**Н. В. Филиппов,** М. А. Каракин, В. И. Крауз, В. В. Мялтон,  
Т. И. Филиппова, А. Н. Филиппов, Э. Ю. Хаутиев

Институт ядерного синтеза Российского научно центра "Курчатовский институт", Москва, Россия  
E-mail: filippov@qq.nfi.kiae.su

*Приводятся результаты экспериментальных исследований процесса нецилиндрической кумуляции токоплазменной оболочки (ТПО) плазмофокусного разряда и влияния профиля ТПО на параметры кумулятивных плазменных потоков и пучков заряженных частиц. Обсуждаются новые возможности практического использования направленной энергии пучково-плазменных потоков.*

Одной из основных отличительных особенностей плазмофокусного (ПФ) разряда является нецилиндричность ТПО в стадии ее радиального сжатия. В системах типа Филиппова стадия радиального нецилиндрического сжатия является основной, что определило второе название этих систем — "нецилиндрический Z-пинч". В системах типа Мейзера эта стадия занимает относительно небольшой по времени отрезок по сравнению со стадией ускорения ТПО в межэлектродном зазоре, однако именно ее наличие определяет основные отличительные особенности этих систем и позволяет объединить оба типа разряда в единый класс — класс плазмофокусных разрядов. Прямым следствием нецилиндричности ТПО является образование кумулятивных плазменных потоков, направленных вдоль оси системы. Вынос плазмы из зоны компрессии формирующимся потоком определяет сценарий последующего развития физических процессов в ПФ.

В ПФ-установках режим разряда определяется двумя основными факторами — формой и размерами внутреннего электрода (анода) и формой и массовым составом ТПО. Конструкция анода, техническая реализация его отдельных участков (кромка, участок радиального движения, центральная анодная вставка) обеспечивают устойчивость и симметрию радиальной кумуляции и, главное, позволяют управлять влиянием приэлектродных процессов на динамику и форму ТПО. Форма оболочки характеризуется степенью кривизны ее переднего фронта и однородностью и симметричностью по азимуту. Именно форма ТПО в значительной степени определяет условия вытекания плазмы из области кумуляции, что, в свою очередь, влияет на степень сжатия плазмы, развитие микротурбулентности, генерацию высокоэнергичных пучков заряженных частиц (электронов и ионов), генерацию рентгеновского излучения (РИ) и нейтронов. Реально влияние всех этих факторов таково, что причина (взаимодействие с электродом) и следствие (форма ТПО) взаимозависимы, и причина и следствие могут меняться друг с другом местами. Однако именно это открывает возможность варьирования профилем ТПО и является одним из способов эффективного управления режимом разряда и способом влияния на интенсивность различного рода излучений, на образование и параметры кумулятивных струй.

Кумулятивный эффект лежит в основе наиболее распространенных схем импульсного УТС (лазерный синтез, схемы с использованием РЭП и т. д.). Смысл этого эффекта заключается в передаче энергии, первоначально накопленной в большой массе плазмы или магнитном поле, сравнительно малому количеству частиц с выигрышем в температуре (или скорости) последних. В тео-

рии кумулятивных снарядов на взрывчатых веществах (ВВ), например, было показано [1], что при схлопывании конических оболочек с углом конуса в вершине  $2\alpha$  на оси конуса формируется струя, в которую вовлекается до 10 % массы ВВ, а скорость струи  $V_j$  определяется соотношением:  $V_j = V_r / \operatorname{tg}\alpha$ , где  $V_r$  — скорость сжатия конуса (в применении к ПФ-разрядам  $V_r$  — скорость радиального сжатия ТПО). В случае ВВ эффект конической кумуляции обеспечивает получение  $V_j = 9 \cdot 10^6$  см/с, что соответствует увеличению скорости более чем на порядок. В плазменных экспериментах чисто гидродинамический эффект, имеющий место в твердотельных ВВ, заменяется на магнитно-гидродинамический, открывающий возможность перехода к существенно более высоким температурам и скоростям потоков, что и пытаются использовать в схемах УТС.

В отличие от всех термоядерных систем на основе искусственно создаваемых твердотельных мишеней специальной конструкции (одноразовые эксперименты) в ПФ-разряде эффект кумуляции — самореализуемое явление, которое имеет место в каждом рабочем импульсе ПФ-установки. При этом, в зависимости от профиля сходящейся к оси "конической" ТПО, происходит трансформация радиальной скорости сжатия в продольную скорость плазменного потока, причем последняя может более чем на порядок превышать радиальную скорость сжатия ТПО. Известно, что в случае оптимизированного ПФ-разряда (динамика ТПО оптимально согласована с параметрами разрядного контура) радиальная скорость оболочки в заключительной стадии сжатия может достигать  $(3 \div 5) \cdot 10^7$  см/с независимо от типа используемого газа. Таким образом, открывается возможность достижения скоростей плазменного потока  $> 10^8$  см/с, что может представлять значительный интерес для многих практических приложений, включая проблему УТС.

Динамика ТПО в зоне кумуляции исследовалась на установке ПФ-3 методом скоростной рентгеновской хронографии мягкого рентгеновского излучения (МРИ) области компрессии плазмы с помощью диагностического комплекса на основе скоростного фоторегистратора СФЭР-6. Схема измерений показана на рис. 1, а. Эксперименты были выполнены при  $W = 450 \div 700$  кДж, рабочий газ неон,  $P = 1$  торр. При ориентации щели регистратора перпендикулярно оси пинча показано, что время "жизни" высокотемпературной плазмы в каждом данном сечении пинча порядка 20 нс (см. рис. 1, б) при полной длительности импульса МРИ из всего объема пинча  $t_p = 150 \div 220$  нс. Возникший парадокс получил объяснение при анализе аналогичных рентгенохронограмм, полученных при развертке изображения через щель, параллельную оси пинча — на развертках МРИ видно (см. рис. 1, в), что сжатие реализуется последовательно в разных сечениях по высоте пинча и является следствием ярко выраженной нецилиндричности ТПО — "эффект ножниц". Фазовая скорость перемещения зоны максимальной светимости пинча в МРИ вдоль оси составляет  $(0,7 \div 2) \cdot 10^8$  см/с. Кумуляция нецилиндрической ТПО определяет условия формирования и параметры генерируемых вдоль оси потоков. Общее малое время существования зоны кумуляции  $t_p$  превращает поток в высокоэнергичный плазменный сгусток, размер которого  $\delta = V_j t_p$ .

Как правило, в работах по ПФ исследованию самих кумулятивных потоков обычно уделяется существенно меньше внимания, чем процессам радиального сжатия. Исследования последних нескольких лет показали, что интенсивные высокоскоростные плазменные потоки могут представлять и самостоятельный интерес. Они могут быть использованы, например, в ряде технологических про-

цессов при обработке поверхностей с целью придания им новых свойств, при лабораторном моделировании целого ряда астрофизических явлений и др.

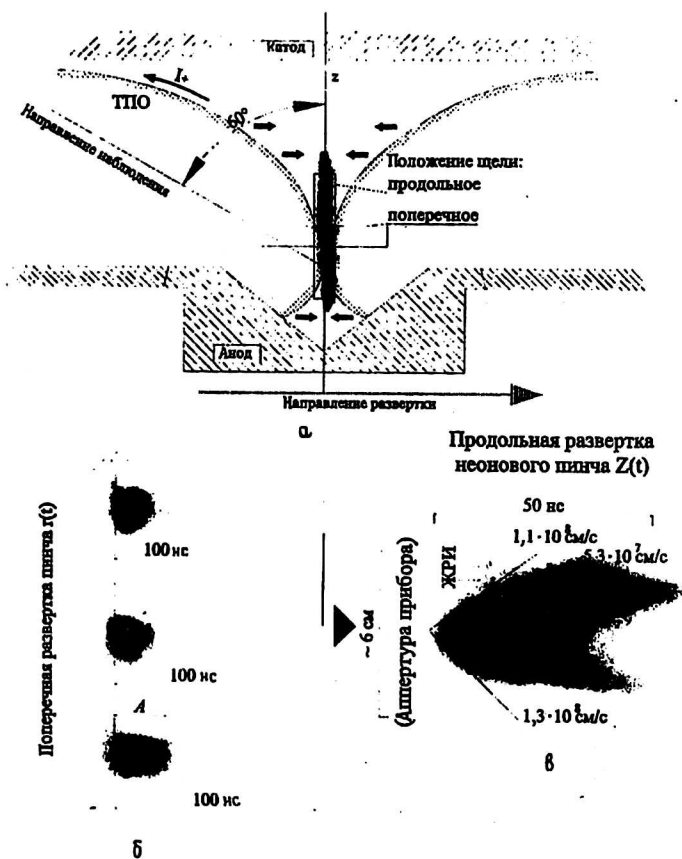


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментов и типичные рентгенохронограммы объемного излучения неоновго пинча на установке ПФ-3:

а — схема эксперимента и фотография интегрального изображения пинча в мягком рентгеновском спектре излучения; б — примеры рентгенохронограмм пинча  $r(t)$  на высоте  $z = 1,5$  см от плоскости анода, полученных при ориентации входной щели регистратора перпендикулярно оси пинча и при разных скоростях развертки; в — рентгенохронограмма пинча  $Z(t)$  при ориентации щели вдоль оси пинча

Вопросам генерации и распространения кумулятивных плазменных сгустков в газовых средах и, в частности в рабочем газе камеры ПФ, была посвящена отдельная серия экспериментов, выполненных на двух однотипных установках (ПФ-3 и ПФЕ), заметно отличающихся между собой, прежде всего, величиной энергозапаса источника питания. Это позволило существенно расширить диапазон экспериментальных условий по уровню разрядного тока, давлению и типу рабочего газа и провести исследования с использованием различных модификаций формы центральной части анода (различные анодные вставки). Принципиальная экспериментальная схема показана на рис. 2. Основные отличия в экспериментальных условиях (помимо геометрических размеров разрядной системы) следующие: установка ПФ-3 —  $W = 500$  кДж, центральная анодная вставка конусообразной формы, расстояние  $L$  от плоскости анода до плоскости регистрации плазменного потока 40 см; установка ПФЕ —  $W = 50$  кДж, центральная анодная вставка плоской формы (медь, тантал),  $L = 30$  см. Для исследования динамики плазменных потоков использовались скоростное фотографирование ТПО на стадии ее схождения к оси, щелевая развертка плазмен-

ного потока на значительном удалении ( $\sim L$ ) от области плотного пинча с ориентацией щели как вдоль оси системы, так и параллельно плоскости анода и так называемые "световые зонды". Последние представляют собой коллиматоры, собирающие световое излучение из узкой области разрядной камеры (с усреднением по диаметру камеры). Собранный свет подается на вход световода и затем на фотокатод ФЭУ. Путем тщательной коллимации достигается пространственное разрешение в несколько миллиметров, что позволяет измерить среднюю скорость плазменного потока на известной пролетной базе. Использование двух световых зондов, разнесенных на расстояние  $\Delta L \ll L$ , позволяет определить "мгновенную" скорость в точке наблюдения. Обычно для определения мгновенной скорости использовалось измерение разности в появлении сигналов  $\Delta t = t_2 - t_1$  двух световых зондов, разнесенных на расстояние  $\Delta L = 3$  см при  $L = 30-40$  см. В качестве реперной точки отсчета времени  $t_0$  использовался момент появления сигнала на световом зонде, связанного со свечением световода под воздействием жесткого рентгеновского излучения и/или с ионизацией рабочего газа мягким рентгеновским излучением ПФ в стадии максимального сжатия ТПО на оси.

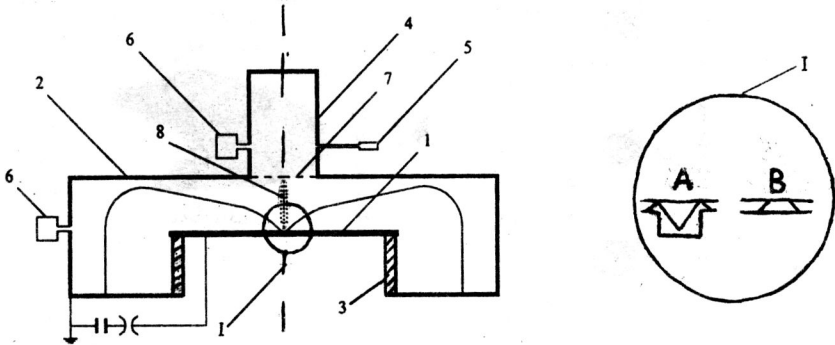


Рис. 2. Схема экспериментов по исследованию кумулятивных плазменных потоков:

1 — анод; 2 — катод; 3 — изолятор; 4 — дрейфовая труба (цилиндрическое продолжение вакуумной камеры); 5 — световой зонд; 6 — скоростной фоторегистратор СФР-2М; 7 — сменная центральная диафрагма; 8 — плазменный поток; I — анодная вставка: А — с коническим углублением; В — плоская анодная вставка

Сравнительный анализ результатов исследований параметров плазменного потока, генерируемого в плазмодиффузионном разряде при схлопывании ТПО на оси системы, показал, что, несмотря на значительную разницу в уровне энергетике и на различие по массе используемых газов (Ar, Ne,  $D_2$ ), средняя скорость плазменного потока на пролетной базе 30—40 см в оптимальных разрядах достигает приблизительно одинаковой величины ( $\sim 10^7$  см/с). Пример осциллограмм световых зондов показан на рис. 3.

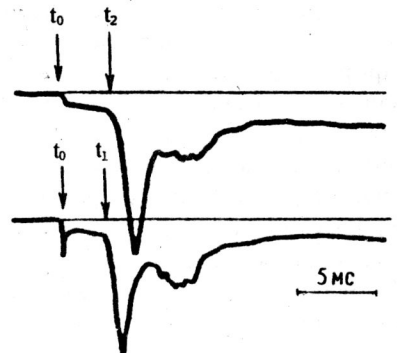


Рис. 3. Осциллограммы световых детекторов, расположенных на различных расстояниях  $L$  от плоскости анода:

верхний луч —  $L = 41$  см, нижний луч —  $L = 38$  см;  
 $t_0$  — момент максимального сжатия ТПО на оси,  
 $t_1$  и  $t_2$  — моменты появления плазменного потока в области регистрации световых зондов

Анализ формы плазменного сгустка свидетельствует о том, что поперечные размеры потока на расстоянии  $\sim 40$  см от анода составляют 7—10 см, из чего следует, что поперечная скорость ионов плазмы (обусловленная тепловым расширением сгустка) почти на порядок меньше скорости направленного движения плазменного потока. Фотография щелевой развертки плазменного сгустка при ориентации щели параллельно плоскости анода, полученная на установке ПФ-3 при разряде в неоне, приведена на рис. 4.



*Рис. 4. Щелевая развертка изображения плазменного потока на расстоянии 38 см от плоскости анода; щель параллельна плоскости анода*

Как уже отмечалось выше, параметры плазменного потока должны существенным образом зависеть от профиля сходящейся ТПО, которым, в свою очередь, можно эффективно управлять изменяя профиль центральной анодной вставки и род рабочего газа [2]. Используемые в данной работе экспериментальные установки были оптимизированы на различные режимы: режим работы установки ПФ-3 характеризуется формированием плотного протяженного пинча, являющегося мощным источником мягкого рентгеновского излучения [3], в то время как режим работы установки ПФЕ является в некотором смысле ему противоположным — с "убеганием" токовой оболочки, при котором осуществляется эффективное сжатие тока без сгребания и сжатия плазмы рабочего газа [4]. Это отличие режимов заметно проявляется в экспериментах по исследованию кумулятивных плазменных потоков. Для установки ПФ-3 характерна высокая повторяемость результатов, основной отличительной особенностью которых является близость средней скорости потока на пролетной базе к скорости радиального сжатия ТПО и к мгновенной скорости в точке наблюдения —  $(0,5-1,5) \cdot 10^7$  см/с. В экспериментах на установке ПФЕ (оптимизированной на режим с "низкой" токовой оболочкой) интенсивность и средняя скорость плазменного потока обычно ниже. Однако наблюдаемые при этом в ряде разрядов скорости  $\geq 10^7$  см/с (при на порядок более низком энергокладе в разряд, чем в экспериментах на установке ПФ-3 и при более тяжелом газе — аргоне) являются, на наш взгляд, прямым свидетельством кумулятивного механизма генерации плазменного потока. Характерно, что такие разряды являются обычно "неудачными" с точки зрения развития режима с "убеганием" токовой оболочки: происходит, по-видимому, формирование плотного пинча с одновременным снижением выхода пучков ускоренных частиц.

В то же время для генерации ионных и электронных пучков предпочтительнее оказываются именно системы с плоским анодом. При этом значительное влияние на параметры пучков оказывают его теплофизические, абсорбционные и другие свойства. Проведенные на установке ПФЕ работы по оптимизации параметров пучков показали, что лучшие результаты достигаются при работе с

плоской танталовой вставкой. Динамика приэлектродных процессов в этом случае приводит к более эффективной контракции разрядного тока на оси камеры. Как следствие этого, в разрядах с танталовой вставкой возрастает интенсивность жесткого РИ, а использование абсорбционных свойств танталового анода позволяет получать значительные по величине нейтронные выходы при предварительном насыщении анода газообразным дейтерием [5]. В качестве основного рабочего газа при этом используется  $\text{Ag}$ , что облегчает достижение согласования разрядной камеры с источником питания и позволяет оптимизировать общую динамику ТПО. С помощью масс-спектрометра МХ-7304 проведено исследование динамики состава рабочего газа и его влияния на последующий разряд ("предыстория" разряда) как в процессе вывода установки в режим с генерацией рентгеновского и нейтронного излучений ("отбивка" камеры), так и в режиме с их интенсивной генерацией. Показано, что при использовании танталовой вставки наблюдается интенсивное поглощение дейтерия при напуске последнего в разрядный объем. В этой серии экспериментов при последующей работе на аргоне в составе рабочего газа зафиксировано небольшое количество дейтерия (на уровне нескольких процентов). В тоже время, как отмечено выше, в разрядах регистрировалось достаточно интенсивное нейтронное излучение, что связывается нами с ускорительными процессами на поверхности центральной анодной вставки: нейтронное излучение возникает при взаимодействии ускоренных в прианодной области дейтронов с дейтерием, абсорбированным в катодной части разрядной камеры. Использование катодного узла со шлюзом и сменной центральной диафрагмой показало, что ускоренные дейтроны имеют достаточно широкое угловое распределение: нейтронное излучение сохраняется на достаточно высоком уровне при замене центральной части катодной диафрагмы диаметром 12,5 см на новую, не насыщенную дейтерием. В тоже время нейтронное излучение исчезает при замене танталовой вставки на медную. Наблюдаемое при этом незначительное присутствие дейтерия в разрядном объеме связано, по-видимому, с его десорбцией с поверхности изолятора. Несмотря на относительно небольшую величину нейтронного выхода ( $\sim 10^8$ ) по сравнению с выходом, получаемым в традиционных разрядах с чистым дейтерием ( $\sim 10^9$ ), этот способ генерации нейтронов может иметь ряд преимуществ, связанных с возможностью получения значительно более высоких флюенсов (источником нейтронов является катод системы, в непосредственной близости от которого можно размещать облучаемые образцы).

Ближкие результаты в исследованиях кумулятивных плазменных потоков были получены на установках типа Филиппова (ПФЕ и ПФ-3) и типа Мейзера (КПФ-3), работающих в диапазоне энергетике 0,05–1,0 МДж. Можно сделать вывод, что независимость величины, достигаемой при кумуляции скорости  $V_j$  от массового состава ТПО (при сохранении условий согласования динамики ТПО с параметрами источника питания), является фундаментальным свойством разрядов, основанных на нецилиндрическом сжатии. Из этого вытекает также следующий важный, на наш взгляд, вывод: при использовании тяжелых газов открывается возможность получения плазменных потоков с энергией частиц в несколько десятков кэВ/частицу и выше. При торможении таких плазменных сгустков на различных мишенях должна выделяться значительная энергия, которая может использоваться, в частности, для обработки поверхности. Значительный интерес представляет также исследование возможности передачи импульса от плазменного потока различным макрочастицам с целью лабораторного моделирования микрометеоритов. Самостоятельный интерес представляют эффекты, возникающие при торможении подобных сгустков на различных мишенях.

Процессы взаимодействия плазменных потоков с веществом изучались на установке КПФ-3. Эта установка представляет собой плазменный фокус типа Мейзера. Диаметр внутреннего электрода (анода) — 110 мм, наружного штыревого — 150 мм, длина электродной системы — 110 мм, изолятор — алунд. Рабочий газ — дейтерий при давлении 5÷8 торр. Энергия источника питания 130÷150 кДж при зарядном напряжении 30÷33 кВ. Непосредственной целью экспериментов была задача создания микрометеоритного "дождя" при ускорении макрочастиц кумулятивным потоком плазмы. Схема экспериментов показана на рис. 5, а. Подача макрочастиц была организована в виде дозированного непрерывного потока песчинок (масса крупинок около 10 мг) или железных опилок в область, близкую к зоне кумуляции ТПО (~ 2 см от анода), для того, чтобы реализовать максимальную плотность энергии в потоке, с одной стороны, и не нарушать процесс формирования плазменного фокуса, с другой. Последнее контролировалось измерением характеристик ПФ, включая измерение нейтронного выхода ( $Y_n = 10^9 \div 10^{10}$  н/имп) и фотографирование пинча с помощью камеры-обскуры. Последняя настраивалась таким образом, чтобы в поле зрения попадали область формирования ПФ и область взаимодействия плазменного потока с макрочастицами. Камера-обскура имела два отверстия диаметром 0,6 мм, закрытых фильтрами 9 и 18 мкм Al. Эффект ускорения песчинок (передачи импульса) оценивался по результатам воздействия их на тонкие металлические мишени (Cu, Al толщиной 0,1÷1 мм), устанавливаемые на расстоянии 35 см от анода. В контрольных разрядах (без подачи макрочастиц) плазменный поток не оказывал заметного воздействия на мишени-мембраны. При подаче песчинок поток ускоренных макрочастиц разрушал мишени толщиной до 0,5 мм. Неожиданным сопутствующим явлением, обнаруженным в этих экспериментах, оказалась генерация МРИ на поверхности отдельных макрочастиц при воздействии на них кумулятивного плазменного потока (см. рис. 5, а).

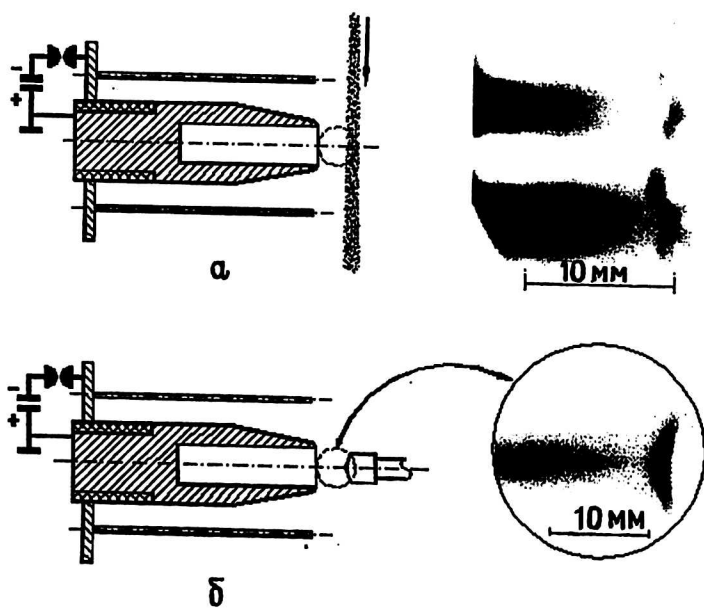


Рис. 5. Схема экспериментов по исследованию взаимодействия плазменных потоков с мишенями и интегральные обскурограммы:

- а — при подаче в зону взаимодействия макрочастиц; камера-обскура с двумя отверстиями, закрытыми фильтрами 9 и 18 мкм Al;
- б — титановая мишень; камера-обскура с одним отверстием, фильтр — 9 мкм Al

Для более детального исследования этого явления была изготовлена специальная титановая мишень (см. рис. 5, б), которая имела конусообразную форму диаметром 30 мм, изолировалась от камеры и устанавливалась по оси системы на расстояниях 30–50 мм от анода. Как следует из обскурограмм, это расстояние превышает продольные размеры пинча (использовалась камера-обскура с одним отверстием диаметром 0,6 мм, закрытым алюминиевым фильтром толщиной 9 мкм). Однако в экспериментах наблюдается интенсивное свечение приповерхностного слоя мишени. Толщина изображения излучающего слоя близка к удвоенному диаметру входного отверстия обскуры, откуда следует, что его реальная толщина  $< 0,6$  мм.

Механизм возникновения этого рентгеновского излучения недостаточно ясен. Несомненно то, что оно возникает под воздействием кумулятивных плазменных потоков. Возможно оно связано с испарением и ионизацией материала мишени. Не исключен также механизм, связанный с ударно-волновой термализацией направленной энергии кумулятивного плазменного потока при его взаимодействии с мишенью. По предварительным оценкам, эффективность такого механизма трансформации энергии струи в МРИ может быть достаточно высока. В этом случае, в соответствии с упоминавшейся выше возможностью получения потоков с направленной энергией частиц в несколько десятков и даже сотен кэВ, вызывает значительный интерес разработка новых принципов создания мощных источников рентгеновского излучения с регулируемым спектром излучения. В частности, разработка подобных источников с энергией квантов  $\geq 10$  кэВ является достаточно актуальной задачей. Интересным представляется также возможность внешнего управления формой источника, которая будет определяться как формой плазменного потока, так и формой мишени.

### Литература

1. Лаврентьев М. А. // УМН, 1957. Т. 12. Вып. 4. С. 41.
2. Филиппов Н. В. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. Вып. 1. С. 24.
3. Filippov N. V., Filippova T. I., Khutoretskaja I. V., Mialton V. V., Vinogradov V. P. // Phys. Lett. A, 1996, № 211. P. 168.
4. Filippov N. V., Bazdenkov S. V., Beljaeva I. F. et al. // Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res., IAEA, Vienna, 1975. V. III. P. 133.
5. Filippov N. V., Filippova T. I., Karakin M. A., Krauz V. I., Brzosko J. R., Brzosko J. S. 23<sup>rd</sup> Europ. Conf. on Contr. Fus. and Plasma Phys., Contrib. Pap. Pt II. P. 653.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 97-02-17945  
и гранта ИНТАС 96-0197.*

## GENERATION OF PLASMA JETS AND BUNDLE OF CHARGED PARTICLES IN PLASMA FOCUS DISCHARGE

**N. V. Filippov, M. A. Karakin, V. I. Krauz, V. V. Myalton, T. I. Filippova, A. N. Filippov, E. Yu. Khautiev**

Nuclear Fusion Institute of Russian Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia  
E-mail: filippov@qq.nfi.kiae.su

*Experimental study results of the process of a non-cylindrical plasma-current sheath (PCS) cumulation in the PF-discharge and on those of an effect of the PCS-profile on the parameters of cumulative plasma jets and those on charged particle beams are given. New opportunities in practical implementation of directed beam-plasma fluxes energy are discussed.*