

УДК 621.039.61:533.952

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ПЛАЗМОФОКУСНОМ РАЗРЯДЕ

С.С. Ананьев, В.И. Крауз, В.В. Мялтон, А.М. Харрасов

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

На плазменном фокусе ПФ-3 методами скоростной фоторегистрации исследована стадия формирования пинча, являющегося источником аксиального плазменного потока. Основной упор был сделан на регистрацию начального момента генерации потока. Комбинация нескольких щелевых развёрток, размещаемых в различных направлениях и на различном удалении от плоскости анода, позволила воссоздать пространственную картину формирования аксиальных потоков вещества. Обнаружены потоки вещества, распространяющиеся быстрее ($1,3 \cdot 10^7$ см/с), чем плазма, вытесняемая по оси магнитным поршнем ($0,5 \cdot 10^7$ см/с). Вероятнее всего, именно эти потоки вещества наблюдаются на значительном удалении от анода в виде компактных джетов.

Ключевые слова: плазменный фокус, Z-пинч, щелевая развёртка, скоростная фоторегистрация, плазменный поток, моделирование астрофизических джетов.

INVESTIGATION OF FORMING PLASMA FLOW GENERATED IN PLASMA FOCUS DISCHARGE

S.S. Ananyev, V.I. Krauz, V.V. Myalton, A.M. Kharrasov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The pinch forming stage, which is the source of the axial plasma flow, was studied on the plasma focus facility PF-3 by means a high-speed photorecording. We focused on the recording initial moment of the flow generation. The combination of multiple slotted streaks being placed in different directions and at different distances from the anode plane has allowed to recreate the spatial picture of the axial plasma flows formation. Axial substance flows dynamics at different heights above the anode was recorded. Substance flows spreading faster ($1.3 \cdot 10^7$ cm/s) than plasma, displaced by magnetic plunger along the axis ($0.5 \cdot 10^7$ cm/s) were detected. Most likely, these substance flows are observed at a considerable distance from the anode in the form of compact jets.

Key words: plasma focus, Z-pinch, high-speed photographic, streak-camera, plasma flow, simulation of astrophysical jets.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-1-21-35

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что плазменные потоки широко используются в различных областях науки и техники. Одним из направлений использования плазменных потоков является лабораторное моделирование астрофизических процессов, а именно генерации и распространения джетов. Значительный прогресс в моделировании астрофизических джетов достигнут с помощью мощных лазеров [1] и Z-пинчей [2, 3]. Установки типа «плазменный фокус», принцип действия которых основан на пинчевании нецилиндрической токонесящей плазменной оболочки на оси системы, также известны как источники интенсивных плазменных потоков [4]. Анализ параметров этих потоков показывает, что они могут быть эффективно использованы для моделирования джетов молодых звёздных объектов. В НИЦ «Курчатовский институт» ведётся цикл работ по моделированию астрофизических джетов [5, 6]. Основной акцент этих экспериментов сделан на моделировании распространения джета в межзвёздной среде. Базовые эксперименты выполняются на установке ПФ-3 (рабочий энергозапас до 1 МДж, ток на нагрузку до 4 МА). Получены результаты по определению формы и структуры плазменного потока, плотности и температуры как самого потока, так и фоновой плазмы, распределения захваченных магнитных полей [7—10]. Исследована динамика торможения потока в фоновой плазме в зависимости от сорта рабочего газа при его распространении на значительные расстояния (до 100 см) [11]. Промоделирована динамика сжатия токонесящей плазменной оболочки (ТПО) на ось [12] с образованием плотного пинча.

Особенностью схемы «плазменного фокуса» является нецилиндрическое радиальное схождение ТПО [13] (рис. 1, а). В результате этого формирование пинча (в плазменном фокусе ПФ) при сжатии ТПО на оси происходит сперва у анода и далее распространяется в направлении катода (со скоростью, определяемой углом раствора конуса ТПО и особенностями работы установки). Взаимосвязь интенсивности рентгеновского излучения с углами раствора исследовалась также для конических проволочных сборок [14].

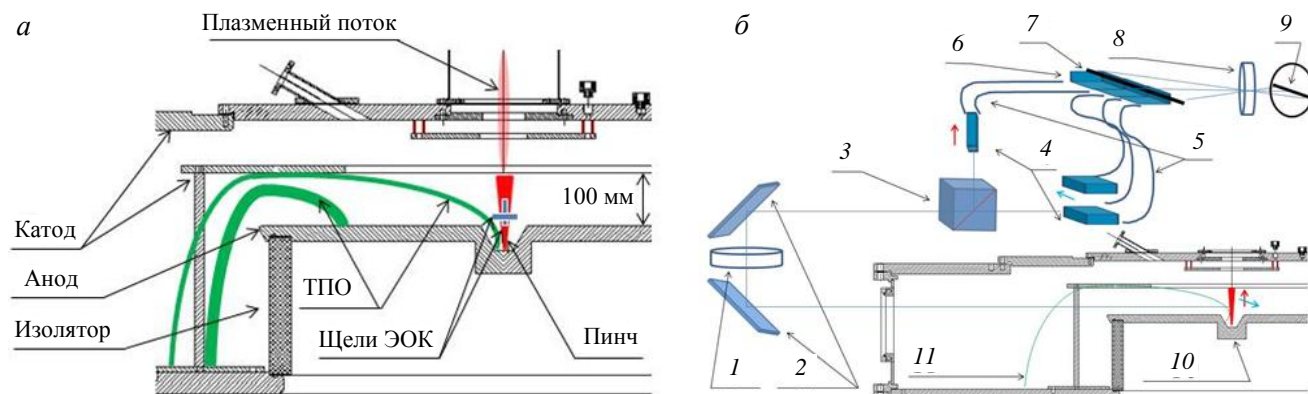


Рис. 1. Схема формирования пинча (а) и схема диагностики для регистрации динамики ТПО на установке ПФ-3 (б): 1, 8 — объективы; 2 — непрозрачные зеркала; 3 — полупрозрачное зеркало (светоделительный куб); 4 — торцы световодов с регулярным расположением волокон; 5, 7 — времяанализирующая щель; 9 — фотокатод электронно-оптического регистратора (ЭОК) с целевой развёрткой; 10 — вакуумная камера; 11 — токонесущая оболочка; синей и красной стрелками показаны измеряемые компоненты скорости ТПО для разных каналов оптоволоконного жгута — разных участков развёртки

Именно стадия плотного плазменного фокуса являлась объектом наиболее пристального внимания экспериментаторов за последние 40 лет, что обусловлено прежде всего экстремальными параметрами плазмы и генерацией излучения в широком диапазоне. Однако комплексного подхода к изучению зарождения плазменных потоков из ПФ до настоящего времени не производилось. Основные интегральные параметры плазмы и излучений были получены ещё в первых работах по ПФ, и дальнейшие исследования были направлены на выяснение основных физических процессов, ответственных, в частности, за механизмы генерации излучений и попытки их интенсификации [3]. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, часто достаточно противоречивый. Однако эти противоречия можно объяснить тем, что при кажущейся схожести объекта, исследуемого в различных лабораториях, физические процессы в них могут существенно отличаться в зависимости от начальных условий формирования плотного ПФ, определяемых характером протекания подготовительных стадий разряда. Достаточно чётко эти различия проявляются в сравнении установок в геометрии Филиппова и Мейзера. Однако и внутри каждого класса установок возможно проявление существенных отличий. Без понимания этого факта, часто игнорируемого, невозможно составление цельной картины явления.

В связи с тем, что плазменные потоки стабильно наблюдаются на значительных расстояниях от ПФ, существенный интерес представляет изучение механизмов формирования аксиальных потоков излучения в области плазменного фокуса. Исследования начального момента генерации потока важны для управления параметрами моделируемых джетов за счёт изменения условий их формирования. В настоящее время нет полной ясности в понимании того, за счёт каких механизмов происходит формирование потоков плазмы, зарегистрированных на значительном удалении от плоскости анода [15].

В данной работе методами скоростной электронно-оптической фоторегистрации исследована стадия формирования пинча, являющегося источником плазменного потока, наблюдались потоки, возникающие в процессе формирования и деградации пинча, за счёт применения различных диагностических средств восстановлена пространственно-временная структура формирующегося плазменного потока.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты выполнены на установке ПФ-3, представляющей собой плазменный фокус с плоской геометрией электродов (тип Филиппова). В центральной части анода имеется сменная вставка, позво-

ляющая значительно увеличить ресурс анода, а также управлять профилем сжимающейся ТПО путём изменения формы этой вставки. В описываемых экспериментах использовалась вставка с коническим углублением диаметром в верхней части воронки 100 и глубиной 70 мм (см. рис. 1, *a*).

Для решения задачи измерения скорости движения плазменной оболочки и особенностей образования пинча разработана оптическая схема на основе электронно-оптической камеры с щелевой развёрткой. Схема регистрации представлена на рис. 1, *б*. Объектив (1) строит изображение пинча, находящегося на оси камеры (10), на входных торцах (4) световодов (5) с регулярным расположением волокон. С помощью непрозрачных зеркал (2) и полупрозрачного зеркала (или светоделительного куба) три изображения одинаковой интенсивности строятся на торцах световодов прямоугольного сечения, объединённых в две группы и ориентированных взаимно перпендикулярно. С противоположного конца световодов (6), имеющих оптический контакт с времяанализирующей щелью (7), изображение переносится объективом (8) на фотокатод (9) электронно-оптического регистратора с временной развёрткой (далее камера (ЭОК)).

Применение волоконно-оптического жгута позволило удобно расположить регистрирующую аппаратуру, избавиться от вибраций, передаваемых от вакуумной камеры установки во время электрического разряда, и избавило от дополнительной юстировки, связанной с деформацией крышки вакуумной камеры, на которой размещается оборудование, при откачке на вакуум. Помимо этого, такая схема позволила производить регистрацию различных ракурсов процесса на одной ЭОК.

В экспериментах использовался оптоволоконный жгут, состоящий из нескольких параллельных сегментов прямоугольного сечения (2×6 мм). Он был сделан таким образом, чтобы с одного конца сегменты, соприкасаясь по короткой стороне прямоугольника, образовывали общий выходной торец, а с другой стороны были разнесены в пространстве и размещены в различных плоскостях. Таким образом, изображения различных областей ПФ, строящиеся с помощью различных оптических элементов на входных торцах сегментов оптоволоконного жгута, сводились рядом друг с другом на другом его конце. К этому торцу на оптическом контакте прижималась времяанализирующая щель ЭОК. В результате на одной щелевой развёртке получались три участка (развёртки), несущие информацию о динамике излучения в двух взаимно перпендикулярных направлениях и геометрически не привязанных друг к другу областях. Это позволило наблюдать как радиальное сжатие токонесущей оболочки, так и определять степень нецилиндричности сжатия в аксиальном направлении. Применение световодов также позволило значительно расширить эффективный динамический диапазон ЭОК, располагая светофильтры различной оптической плотности перед каждым отдельным сегментом.

В ряде экспериментов для наблюдения за динамикой плазмы во всём анод-катодном промежутке применялась схема регистрации, аналогичная описанной, однако использовались волоконные жгуты квадратного сечения со стороной 20 мм. Световоды, сложенные параллельно, образовывали жгут с регулярным расположением волокон с размером торцов 20×40 мм. Положение объектива и масштаб переноса изображения приосевой области установки были подобраны таким образом, чтобы формировать на торцах световодов область, соответствующую 12 см по объекту. При этом наблюдаемая область плазменного образования на оси не превышала 10 см за счёт виньетирования элементами конструкции. Данная схема позволяла наблюдать за динамикой плазмы как в режиме развёртки, так и в кадровом режиме, что позволяло существенно точнее настроить времяанализирующую щель на ось образующегося пинча.

Описанные схемы позволяют получать изображения плазменного образования с пространственным разрешением по объекту не хуже 0,2 мм. Учитывая характер исследуемых процессов, регистрация проводилась на длине развёртки от 1,5 до 1 мкс. Для ширины времяанализирующей щели 0,1 мм получаемое временное разрешение на этой длине развёртки составляло 3—5 нс.

В качестве регистратора были использованы электронно-оптические камеры СФЭР-6 производства НИИИТ и К008 производства Vifocompany. В связи с тем, что ЭОК подвержены воздействию электромагнитных полей и наводок, они помещались в экранированный бокс и снабжались блоком бесперебойного питания (аналогично схеме регистрации, описанной в работе [16]).

Запуск регистраторов и синхронизация осуществлялись из экранированной кабины. Там же располагались осциллографы и блоки дистанционного запуска фоторегистраторов. Схема эксперимента изо-

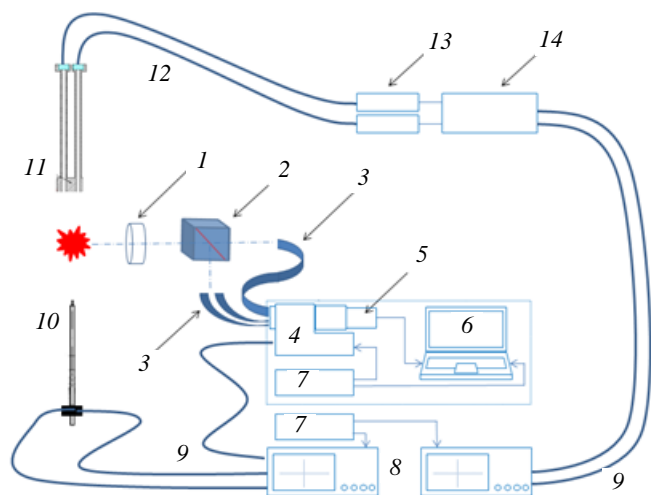


Рис. 2. Диагностический комплекс: 1 — объектив; 2 — полупрозрачный светоделительный куб; 3 — торцы световодов с регулярным расположением волокон; 4 — ЭОК с щелевой развёрткой; 5 — считывающая телевизионная камера; 6 — персональный компьютер; 7 — источник бесперебойного питания; 8 — осциллограф; 9 — высокочастотные соединительные кабели; 10 — зонд измерения магнитного поля; 11 — световой зонд с коллиматором; 12 — световоды; 13 — ФЭУ; 14 — источник питания ФЭУ

образователи (ЭОП) ЭП-16 с импульсным питанием от высоковольтного генератора, собранного по схеме двойной формирующей кабельной линии Блюмлейна. Для регистрации изображений с экранов ЭОП применяются цифровые фотоприставки, аналогичные описанным в работе [17].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

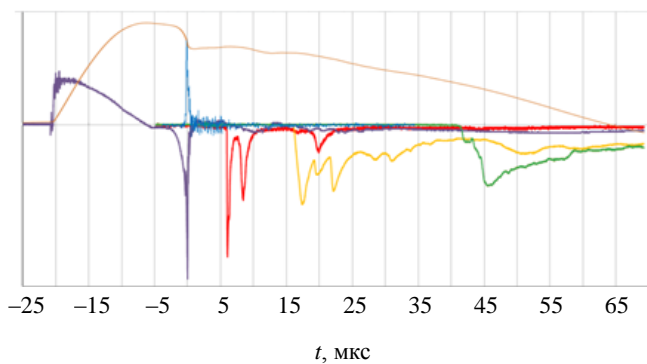


Рис. 3. Временные зависимости полного тока I (—), его производной dI/dt (—), рентгеновского излучения в диапазоне $h\nu \geq 1$ кэВ (—), интенсивности излучения в видимой области, измеренной световыми зондами на оси на высоте 35 (—), 65 (—), 95 см (—) от анодного электрода установки (газ Ne, $P_0 = 1,5$ торр, $U_0 = 9$ кВ)

зается плотный пинч. За счёт использования конического углубления в аноде геометрический центр формирующегося пинча находится в районе плоскости анода. При дальнейшем движении ТПО область её взаимодействия на оси увеличивается в длину, распространяясь в двух направлениях по оси Z (при этом высота пинча ограничена сошедшимся на оси фронтом ТПО). При этом «пинчем» принято называть именно образование, возникающее в результате сжатия ТПО на оси без связи с дальнейшей динамикой плазмы в аксиальном направлении.

бражена на рис. 2. ЭОК К008 комплектуется телевизионной камерой (5) для считывания информации и ноутбуком (6) для записи и обработки данных.

Синхронизация ЭОК с физическим процессом контролировалась с помощью двух осциллографов (8), регистрирующих также сигналы оптических зондов с помощью коллиматора (11), световодов (12), ФЭУ (13) с блоком питания и сигналы магнитного зонда (10). Передача сигналов проводилась по высокочастотным коаксиальным кабелям (9).

Для точной привязки развёртки регистратора к моменту схождения ТПО на ось была использована схема запуска от ФЭУ, регистрирующего свечение токонесящей оболочки на радиусе 30 см от оси. Излучение ТПО собиралось по хорде вакуумной камеры посредством коллиматора.

Для получения скоростных кадровых изображений используются электронно-оптические пре-

образователи (ЭОП) ЭП-16 с импульсным питанием от высоковольтного генератора, собранного по схеме двойной формирующей кабельной линии Блюмлейна. Для регистрации изображений с экранов ЭОП применяются цифровые фотоприставки, аналогичные описанным в работе [17].

Под действием пондеромоторной силы Ампера ТПО с протекающим по ней разрядным током сжимается в область оси установки. Появление «особенности» — обратного выброса на производной полного тока соответствует моменту формирования пинча у анода. Этот момент хорошо совпадает с моментом генерации рентгеновского излучения (рис. 3). За счёт диссипации плазмой пинча электромагнитной энергии, накопленной в разрядной цепи, происходит уменьшение полного разрядного тока.

Как ранее наблюдалось в экспериментах и было смоделировано [12], сжимающаяся токонесящая оболочка имеет радиальную скорость, превышающую скорость аксиального расширения. При достижении ТПО оси установки обра-

Верхняя поверхность ТПО, образующая обратный токопровод (рис. 4), под действием магнитного давления со временем поднимается от анода. На периферии ТПО ограничена катодным диском на высоте 10 см от анода. К моменту достижения ТПО высоты 4—6 см (в приосевой области) наблюдается разрушение пинча вблизи анода за счёт развития неустойчивостей. Можно считать, что именно к этому моменту аксиальный плазменный поток окончательно сформирован и распространяется по оси в направлении от анода. В работе [7] предполагается, что плазменный поток образует магнитный пузырь, содержащий часть магнитного потока, который был сосредоточен в электрической цепи разрядного тока.

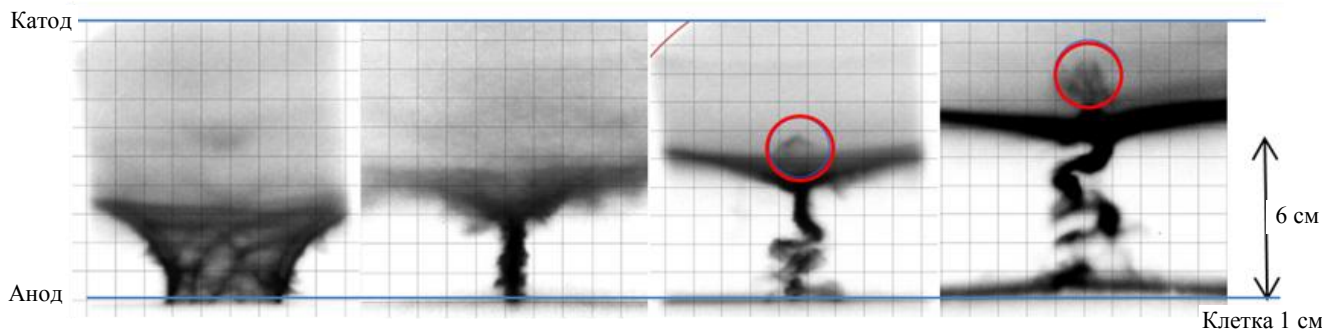


Рис. 4. Скоростные кадровые фотографии имплодирующего пинча. Эксперимент 30 октября 2014 г., выстрел № 3 (Ne). Экспозиция 10 нс. Интервал между кадрами 150 нс. Токонесущая оболочка на стадии сжатия содержит токовые волокна, при формировании пинча он ограничен по высоте (со стороны катода) ТПО, что связано с распределением силовых линий магнитного поля и особенностями работы установки «плазменный фокус» (на рисунке видна «шляпка гриба»). Над ней видны образования, вытянутые вдоль оси установки в направлении от анода (выделено красной окружностью)

В проведённых ранее исследованиях [8] плазменных потоков на удалении 35 см от анода установки наблюдались компактные образования со сложной пространственно-временной структурой, образующие головную часть плазменного потока. Экспериментальные данные существующих диагностических методик не могли дать однозначного ответа о степени правомерности модели образования магнитного пузыря [7]. При постановке экспериментов была задача исследования корреляции динамики образования пинча на его финальной стадии с аксиальными потоками, генерируемыми над уровнем токонесущей оболочки.

Методика щелевой развёртки даёт информацию о динамике процессов только в одном направлении (щель, по определению, одномерна). Поэтому для комплексного анализа необходимо проводить наблюдение с различных направлений. Прежде чем выбрать наиболее информативные области для регистрации (на каждой развёртке получится динамика в выбранном сечении), нужно иметь понимание того результата, который может быть получен при той или иной постановке диагностики.

При постановке экспериментов мы опирались на данные о динамике сжатия ТПО и формировании пинча, полученные разными командами за долгую историю исследования ПФ, а также на результаты моделирования. Именно компьютерное моделирование позволяет лучше понять получаемый результат, поскольку данные любой диагностики, помимо полезного результата, несут «паразитную» информацию, которая может затруднять анализ и скрывать искомые эффекты. В первом приближении плотность почернения на оптических изображениях (и развёртках) пропорциональна квадрату электронной плотности плазмы и протяжённости излучающей области в направлении наблюдения (поскольку свет из ПФ собирается интегрально по направлению наблюдения). Следовательно, плотный, но компактный плазменный поток/объект будет неотличим на оптических изображениях от малоизлучающей плазмы, имеющей большую оптическую толщину. Этот факт является в нашем случае «паразитным». Помимо этого, изображения ТПО в собственном излучении нельзя корректно сравнивать с профилями распределений электронной плотности плазмы, плотности тока, напряжённости магнитного поля, что характеризует геометрию ТПО. Именно компьютерное моделирование «измеряемых» величин помогает правильно трактовать полученную информацию и связывать её с данными других экспериментальных методик.

Наиболее наглядно динамику образования пинча отображают скоростные кадровые изображения. Однако на фоне плотного излучающего пинча плохо различимы процессы формирования аксиального потока (существенно менее плотного). На рис. 4 показаны изображения, полученные при сжатии ТПО, формировании и разрушении пинча. Верхний край ТПО, имеющий в приосевой области малый угол на-

клона к плоскости анода, за счёт своей протяжённости (по радиусу) формирует на кадровых изображениях плотную область — «шляпку гриба». В связи с этим наблюдение за динамикой плазменных потоков в области этой «шляпки» с помощью ЭОП затруднено. Для системы скоростной фоторегистрации динамический диапазон ЭОП подбирался таким образом, чтобы наблюдать потоки в области «шляпки» при локальной «пересветке» области пинча. Также были использованы дифференциальные фильтры, имеющие разную пропускную способность и закрывающие область пинча и область над «шляпкой» по отдельности [18]. За счёт этого удавалось наблюдать распространение потоков над «шляпкой» без потери информативности в области пинча. В связи с ограничением поля зрения на ПФ-3 при наблюдении с радиальных направлений (параллельно плоскости анода) нет возможности видеть распространение струи на расстоянии более 10 см от анода (см. рис. 1, б).

МОДЕЛЬ СЖАТИЯ ТПО И ФОРМИРОВАНИЯ АКСИАЛЬНОГО ПОТОКА

При движении ТПО к оси её фронт движется вдоль анода быстрее [12, 19], образуя воронку (образующая фронта в осевом сечении имеет наклон к вертикали), что приводит к нецилиндричному сжатию ТПО. Рассматривая в первом приближении ТПО в качестве тонкой оболочки, скорость её движения можно представить в виде суперпозиции двух составляющих: параллельной оси (аксиальной) и перпендикулярной (радиальной) (рис. 5, а). При расположении щелей развёрток во взаимно перпендикулярных направлениях изображения на каждой из них будут нести информацию о той или иной составляющей скорости ТПО. Попробуем проанализировать те процессы, которые будут формировать изображения на развёртках.

Обозначив угол раствора конуса α (двойной угол между осью и образующей конической оболочки), получим из геометрических соображений соотношение для составляющих скорости сжатия ТПО, направленной перпендикулярно образующей в направлении оси, в аксиальном и радиальном направлениях: $V_{\parallel} = V_{\perp} \operatorname{tg}(\alpha/2)$, где V_{\perp} — радиальная составляющая скорости ТПО (эта скорость может быть определена по наклону фронта ТПО на радиально-ориентированной развёртке); V_{\parallel} — аксиальная составляющая скорости ТПО. Однако при сжатии конической поверхности ТПО будет наблюдаться эффект поднятия вершины конуса за счёт последовательного прихода на ось образующей конического фронта ТПО — так называемый «зиппер-эффект». Это означает, что при сжатии ТПО на оси мы будем наблюдать (на вертикально-ориентированной развёртке) эффект быстрого увеличения длины излучающей области. В пределе для цилиндрической оболочки наблюдаемая скорость увеличения высоты пинча за счёт «зиппер-эффекта» будет равна бесконечности (см. рис. 5, а). Этот эффект является для нас также «паразитным» — необходимо при анализе наблюдаемой скорости отделить скорость за счёт «зиппер-эффекта» от скоростей, со-

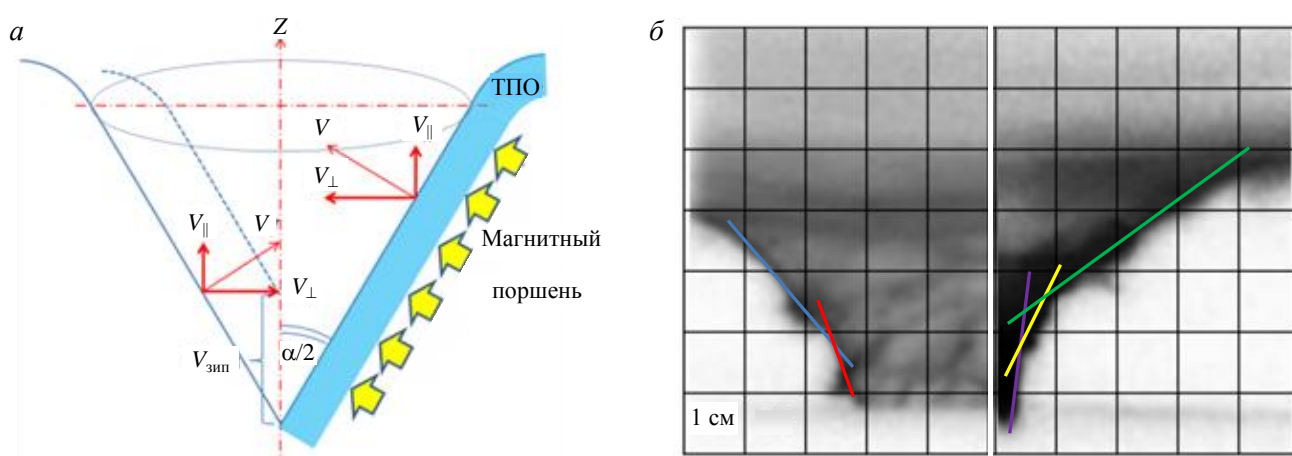


Рис. 5. Определение геометрии ТПО в приосевой области: а — схематическое изображение движения ТПО к оси, стадия сжатия ТПО (–140 нс от момента образования особенности на производной тока); б — изображение ТПО в последовательные моменты времени в собственном излучении (полученные путём скоростного кадрового фотографирования с экспозицией 10 нс), стадия образования пинча (+10 нс). Отмечены характерные углы раствора конусной токовой оболочки (относительно оси симметрии) на различной высоте и на разных стадиях сжатия: 20° (—), 40° (—), 25° (—), 50° (—), 7° (—)

ответствующих движению плазмы вдоль оси. Очевидно, что скорость за счёт «зиппер-эффекта» ($V_{\text{зип}}$) будет определяться углом раствора конусной оболочки и скоростью движения ТПО к оси (V_{\perp}) $V_{\text{зип}} = V_{\perp} \text{ctg}(\alpha/2)$ — опять же из геометрических соображений. Можно считать, что в отсутствие динамики плазмы в аксиальном направлении (только за счёт движения конусной ТПО) на вертикально-ориентированной развёртке будут наблюдаться два фронта, соответствующие скоростям V_{\parallel} — за счёт движения ТПО и $V_{\text{зип}}$ — за счёт «зиппер-эффекта». Поскольку для углов меньше 45° (а именно такие углы наблюдаются в вершине воронки, образованной ТПО при формировании пинча) значение ctg больше чем tg , наблюдаемые нами физически значимые эффекты, связанные с динамикой плазменных потоков вдоль оси (т.е. «массовая» скорость), будут наблюдаться в области $V_{\text{вид}} = \{V_{\parallel} \text{ и } V_{\text{зип}}\}$ (рис. 6).

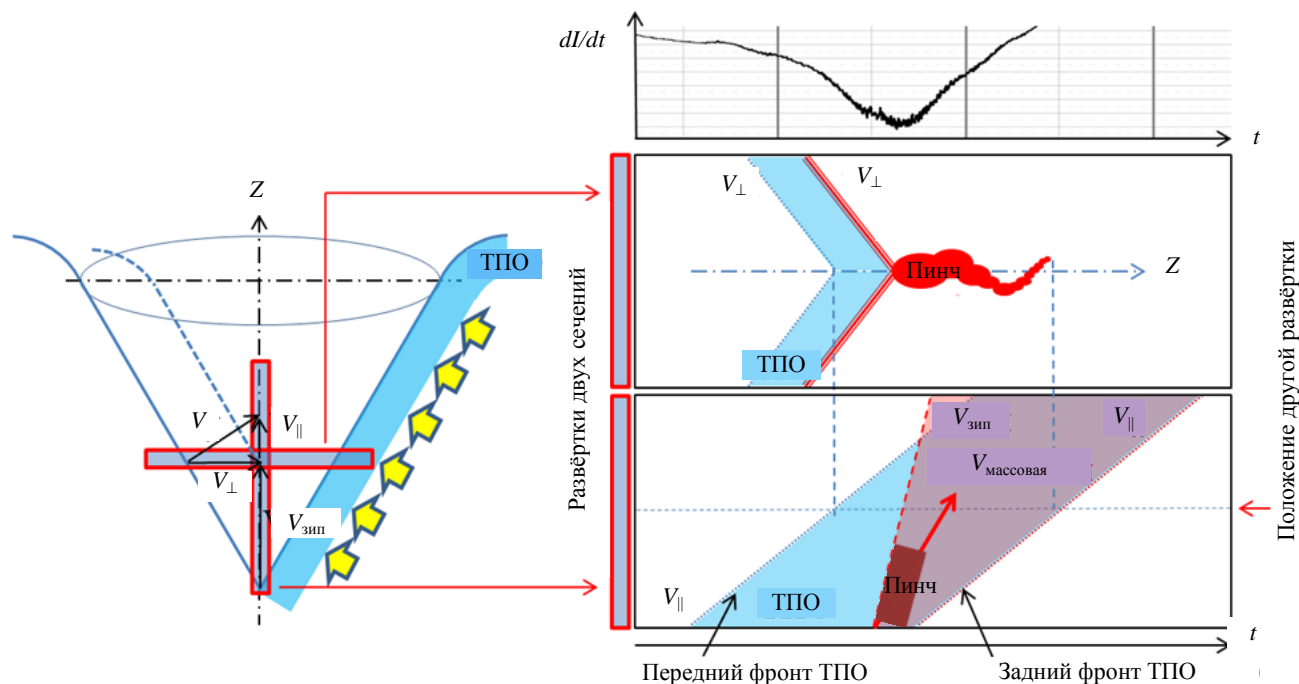


Рис. 6. Постановка эксперимента при расположении щелей развёртки во взаимно перпендикулярных направлениях и ожидаемая динамика, определяемая движением ТПО, образованием пинча и аксиальных потоков вещества

Если модель ТПО немного усложнить, предположив её протяжённой по радиусу (т.е. толстой), тогда к приведённым соображениям добавится влияние заднего фронта ТПО (с фронтом магнитного поля). Это выразится в том, что в прианодной области магнитный поршень будет дожимать пинч, а выше — выдавливать вещество вдоль оси (как выдавливается паста из тубика). По мере вытеснения вещества из области пинча давление плазмы nT на оси может превзойти давление магнитного поля $H^2/8\pi$, в результате чего плазма будет расширяться с образованием неустойчивостей, приводящих к разрушению пинча. Если предположить, что задний фронт ТПО имеет скорость и наклон относительно оси, соизмеримые с значениями для переднего фронта, то вытеснение вещества по оси магнитным поршнем будет происходить со скоростью, близкой к V_{\parallel} . Следовательно, динамика, наблюдаемая на вертикально-ориентированной развёртке, будет аналогична приведённой на рис. 6. Это означает, что, определив по радиально-ориентированной развёртке скорость V_{\perp} , можно вычислить значения V_{\parallel} и $V_{\text{зип}}$ и обозначить область скоростей (на вертикально-ориентированной развёртке), где будут лежать скорости процессов, связанные с аксиальным переносом вещества. На фоне процесса вытеснения плазмы магнитным поршнем вдоль оси и «зиппер-эффекта» необходимо выделить потоки, имеющие скорости выше, чем у ТПО. Скорости таких потоков должны лежать в области $\{V_{\parallel} - V_{\text{зип}}\}$. Именно они наиболее интересны с точки зрения моделирования астрофизических джетов.

Следует учесть, что на развёртках в экспериментах будут присутствовать другие эффекты, связанные с подсветкой/ионизацией газа в области оси установки, сжимающейся ТПО, неравномерным распределением тока в слое ТПО, ионизацией плазмы и газа на оси установки излучением пинча, распространением плазменных потоков в фоновом ионизированном газе и другие.

По скоростным кадровым фотографиям можно определить характерные углы раствора конусной токовой оболочки на различной высоте от анода и на разных стадиях сжатия (см. рис. 5, б). Значение угла раствора оболочки на начальной стадии составляет 20° вблизи анода и 40° выше. На более поздней стадии формирования пинча значения углов в тех же геометрических областях составляют 25° и 50° соответственно (увеличение значения угла связано с динамикой движения ТПО [12]). В области, соответствующей пинчу, токовая оболочка имеет угол 7° к оси. Угол примыкания ТПО к пинчу сохраняется на уровне $35\text{—}45^\circ$ даже на стадии, когда пинч полностью сформирован, но ещё не начал разрушаться. На большей высоте и большем радиусе угол ТПО относительно оси достигает 70° .

В таблице приведены расчётные значения компонентов скорости для диапазона измеренных в эксперименте углов раствора оболочки ТПО. На радиально-ориентированной развёртке регистрируются фронты, формируемые ТПО, движутся с радиальной скоростью $(0,5\text{—}1,5)10^7$ см/с. Как видно из таблицы, аксиальная составляющая скорости ТПО должна быть от $(0,2\text{—}1,5)10^7$ см/с при половинном угле раствора ($\alpha/2$) от 20° до 45° соответственно. Скорость «зиппер-эффекта» на вертикально-ориентированной развёртке при этом окажется в диапазоне $(0,5\text{—}4)10^7$ см/с, что выше для соответствующих значений V_{\parallel} . Эти значения хорошо совпадают с измеренной в экспериментах видимой аксиальной скоростью.

Расчётные значения компонентов скорости для измеренных в эксперименте углов раствора оболочки ТПО

Половинный угол раствора $\alpha/2$	V_{\parallel} , см/с	$V_{\text{зипп}}$, см/с	V_{\parallel} , см/с	$V_{\text{зипп}}$, см/с	V_{\parallel} , см/с	$V_{\text{зипп}}$, см/с
	для $V_{\perp} = 0,5 \cdot 10^7$ см/с		для $V_{\perp} = 1 \cdot 10^7$ см/с		для $V_{\perp} = 1,5 \cdot 10^7$ см/с	
70	$1,50 \cdot 10^7$	$0,17 \cdot 10^7$	$3,00 \cdot 10^7$	$0,33 \cdot 10^7$	$4,50 \cdot 10^7$	$0,50 \cdot 10^7$
50	$0,60 \cdot 10^7$	$0,38 \cdot 10^7$	$1,19 \cdot 10^7$	$0,77 \cdot 10^7$	$1,79 \cdot 10^7$	$1,15 \cdot 10^7$
45	$0,50 \cdot 10^7$	$0,50 \cdot 10^7$	$1,00 \cdot 10^7$	$1,00 \cdot 10^7$	$1,50 \cdot 10^7$	$1,50 \cdot 10^7$
33	$0,33 \cdot 10^7$	$0,76 \cdot 10^7$	$0,66 \cdot 10^7$	$1,52 \cdot 10^7$	$0,99 \cdot 10^7$	$2,27 \cdot 10^7$
26	$0,25 \cdot 10^7$	$1,00 \cdot 10^7$	$0,50 \cdot 10^7$	$2,00 \cdot 10^7$	$0,75 \cdot 10^7$	$3,00 \cdot 10^7$
20	$0,19 \cdot 10^7$	$1,35 \cdot 10^7$	$0,37 \cdot 10^7$	$2,70 \cdot 10^7$	$0,56 \cdot 10^7$	$4,05 \cdot 10^7$
15	$0,13 \cdot 10^7$	$1,92 \cdot 10^7$	$0,26 \cdot 10^7$	$3,85 \cdot 10^7$	$0,39 \cdot 10^7$	$5,77 \cdot 10^7$
7	$0,06 \cdot 10^7$	$4,00 \cdot 10^7$	$0,13 \cdot 10^7$	$8,00 \cdot 10^7$	$0,19 \cdot 10^7$	$12,00 \cdot 10^7$

При расположении щели вертикально-ориентированной развёртки не на оси (или при образовании пинча не на оси камеры) никакого «зиппер-эффекта» наблюдаться не будет. Видимая скорость будет отражать только подъём оболочки (V_{\parallel}). «Зиппер-эффект» будет наблюдаться до тех пор, пока сжатая область ТПО не достигнет высоты шляпки ТПО — тогда $V_{\text{зипп}} = 0$ (так как шляпка практически плоская, $\alpha/2 = 90^\circ$). После этого скорость подъёма изображения на вертикально-ориентированной развёртке будет определяться скоростью подъёма шляпки (за счёт давления магнитного поля). Именно в этой области удобнее всего выделять и наблюдать быстрые аксиальные потоки плазмы со скоростью больше, чем скорость подъёма шляпки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании описанных соображений была сформулирована задача наблюдения за динамикой формирования пинча и генерации плазменных потоков в прианодной области при образовании ПФ. В связи с тем, что верхняя граница ТПО на кадровых изображениях поднимается до высоты $6\text{—}7$ см над плоскостью анода в процессе образования пинча до момента его разрушения, наблюдения проводились на уровнях $0,5$, $4,5$ см (ниже наблюдаемой на кадровых изображениях высоты) и $8,5$ см (т.е. выше уровня) и во всём анод-катодном промежутке.

Наблюдение потоков на стадии образования пинча (на уровне $0,5$ см над анодом). В первой серии экспериментов исследовался процесс сжатия токонесущей оболочки вблизи анодного электрода. Для этого два элемента световолоконного жгута располагались рядом (один в продолжение другого) для расширения поля зрения в направлении, перпендикулярном оси установки. Третий световод был расположен вертикально и ориентирован на оси установки в прианодной области для наблюдения за нецилиндричностью сжатия ТПО в аксиальном направлении.

На рис. 7 приведены характерные развёртки сжатия газовой ТПО с образованием пинча и наблюдением процесса в двух взаимно перпендикулярных направлениях. С помощью одной ЭОК в экспериментах (здесь и далее) получены три отдельные щелевые развёртки свечения плазмы на оси установки, расположенные друг под другом на экране ЭОК. При этом две верхние показывают динамику сжатия оболочки в радиальном на-

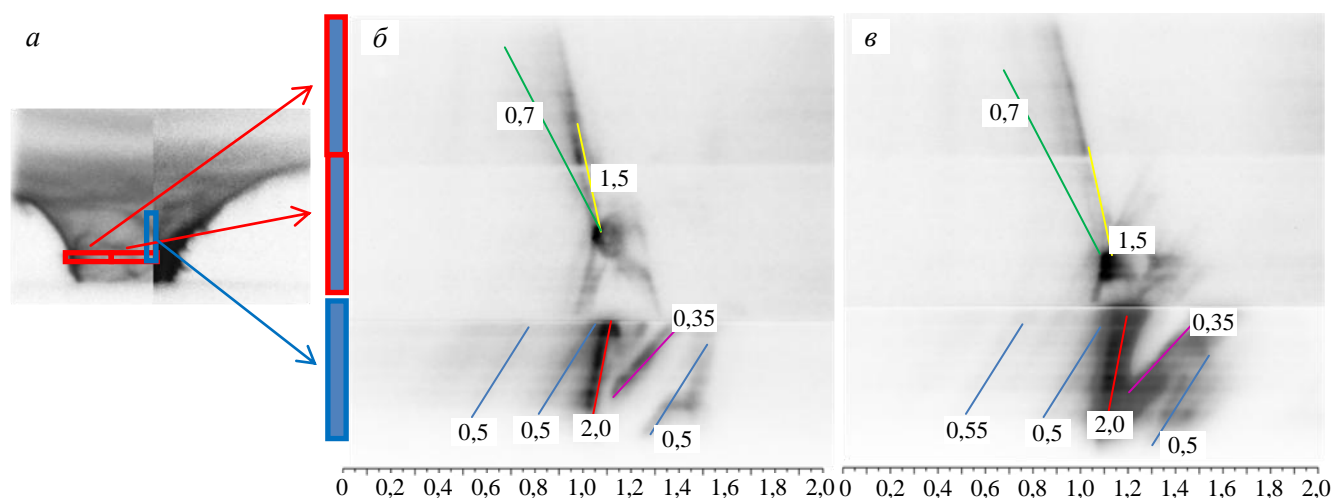


Рис. 7. Кадровые изображения сжатия ТПО (как на рис. 5, б) в последовательные моменты времени (а) и щелевые развёртки свечения плазмы (б, в), рабочий газ Ne: а — схема расположения щелей, изображённых в виде прямоугольников; б — три отдельных щелевых развёртки расположены друг над другом, при этом две верхние в радиальном направлении (поле зрения 4 см по объекту вдоль щели), нижняя — в аксиальном направлении на удалении 0,5 см от анода (поле зрения по объекту 2 см вдоль щели). Скорости, соответствующие наклонным маркерам, $\times 10^7$ см/с: V_1 (—); V_2 (—); V_3 (—); V_4 (—); V_5 (—)

правлении (поле зрения 4 см по объекту вдоль щели) на уровне 0,5 см от анода, нижняя — в аксиальном направлении (поле зрения 2 см вдоль щели) в области 0,5—2,5 см от анода. На рис. 5, а слева от развёрток показана схема расположения времяанализирующих щелей, изображённых в виде прямоугольников. Схема показана в уменьшенном пространственном масштабе по сравнению с развёртками.

На развёртках наблюдаются последовательные фронты (как на радиально-, так и на аксиально-ориентированной), формирующиеся в процессе сжатия ТПО на ось. Их скорости лежат в диапазоне $(0,5—1,5)10^7$ см/с. Этот эффект может иметь различную природу. Во-первых, пробой газа в области изолятора происходит не равномерно по всей образующей, а с образованием каналов (следует отметить, что волокна не перпендикулярны аноду, т.е. волокна, образовавшиеся при начальном пробое газа, закручиваются в процессе схождения оболочки [4]). Попадание такого волокна в поле зрения ЭОК может привести к формированию наклонного фронта на развёртке. При этом скорость будет нести не только информацию о движении, а ещё и о вращении. Во-вторых, при сжатии ТПО к оси могут образовываться замкнутые токовые контуры, что приводит к появлению последовательных ТПО, содержащих часть полного разрядного тока [13, 20].

В момент образования пинча выше уровня 0,5 см над плоскостью анода — на аксиальной развёртке формируется крутой наклонный фронт (с малой длительностью свечения), соответствующий увеличению длины пинча за счёт «зиппер-эффекта» (последовательного схождения оболочки вдоль оси Z). Измеряемая в экспериментах скорость $V_{\text{зип}}$, определяемая по наклону фронта, имеет значение $(2—4)10^7$ см/с и в ряде случаев достигает величины $(6—8)10^7$ см/с, что значительно превосходит радиальную составляющую скорости движения ТПО (см. таблицу). В связи с тем, что высота образующегося пинча превосходит наблюдаемую область, возможности зарегистрировать и выделить «массовую» скорость на развёртках нет. На развёртках за первым фронтом, образующимся за счёт «зиппер-эффекта», наблюдается динамика пинча. Как и ожидалось, задний фронт излучающей области, формирующийся при вытеснении плазмы ТПО вдоль оси магнитным полем, имеет характерную скорость, сравнимую с V_{\parallel} .

Наблюдение потоков на стадии образования пинча (на уровнях 4,5 и 8,5 см над анодом). Во второй серии экспериментов исследовалась динамика сжатия ТПО в районе наблюдаемой на кадровых ЭОП верхней границы ТПО (4,5 и 8,5 см над плоскостью анода). Для этого горизонтально расположенные световоды помещались друг под другом (перпендикулярно оси установки). При этом положение нижнего соответствовало высоте 0,5 см над плоскостью анода (как и ранее), верхнего 4,5 или 8,5 см в различных экспериментах. Третий световод был ориентирован вертикально (как и ранее).

При расположении времяанализирующей щели на высоте 4,5 см над плоскостью анода (что ниже положения токнесущей оболочки, определённого по скоростным фотографиям (см. рис. 4) в момент развала пинча) на развёртке наблюдалось сжатие оболочки, идентичное наблюдаемому на высоте 0,5 см (рис. 8). Сжатие на 4,5 см (на верхней развёртке) менее компактное, нежели у анода (0,5 см), что совпадает с кадровыми изображениями. По задержке с момента сжатия ТПО на уровне 0,5 см до её сжатия на уровне 4,5 см, составляющей в экспериментах 0,2—0,3 мкс, можно определить скорость

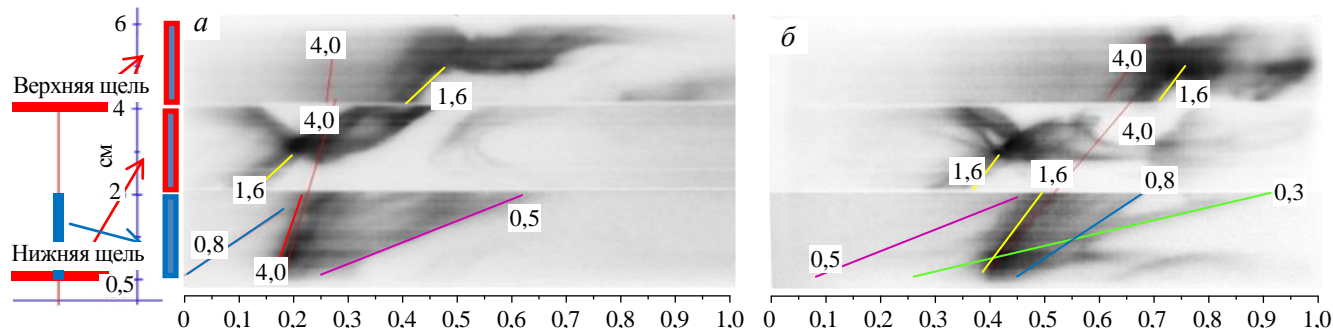


Рис. 8. Щелевые развёртки свечения плазмы. Рабочий газ Ne. Три щелевые развёртки отображают динамику в радиальном направлении (поле зрения 2 см по объекту) на высоте 0,5 и 4,5 см над анодом, нижняя — в аксиальном направлении (поле зрения 2 см по объекту). Скорости, соответствующие наклонным маркерам, $\times 10^7$ см/с: V_1 (—); V_2 (—); V_3 (—); V_4 (—); V_5 (—). Слева от развёрток приведена схема наблюдения расположения щелей, изображённых в виде синих прямоугольников. Красным обозначены щели радиальных развёрток, синим — аксиальной

фактического удлинения пинча (как сжатой области ТПО). Её значение составляет $(1,3—2)10^7$ см/с, что, в свою очередь, больше аксиальной скорости движения ТПО ($V_{||}$) в 1—4 раза (согласно таблице и определённой по наклону фронта на аксиальной развёртке, см. рис. 8), но ниже оценок для скорости «зиппер-эффекта», как и ожидалось. Интенсивность излучения фронтов, образованных на развёртке слоями ТПО позже момента образования пинча, существенно ниже, чем самого пинча. Фрагментарность изображения пинча (см. рис. 8, б) за фронтом его формирования, вероятно, обусловлена выходом его из поля зрения щели при развитии неустойчивостей (см., например, рис. 4). Скорость «разрушения» пинча, определённая по развёрткам на рис. 7, лежит в диапазоне $(0,3—0,8)10^7$ см/с.

В некоторых экспериментах при увеличении чувствительности ЭОК на развёртке (на удалении 4,5 см от анода) удалось различить излучение, возникающее в момент формирования пинча у анода. Интенсивность излучения нарастает со временем, имея модуляцию. По полю зрения профиль практически равномерен (рис. 9). Такое излучение может быть вызвано ионизацией фонового газа и/или подсветкой из плазмы.

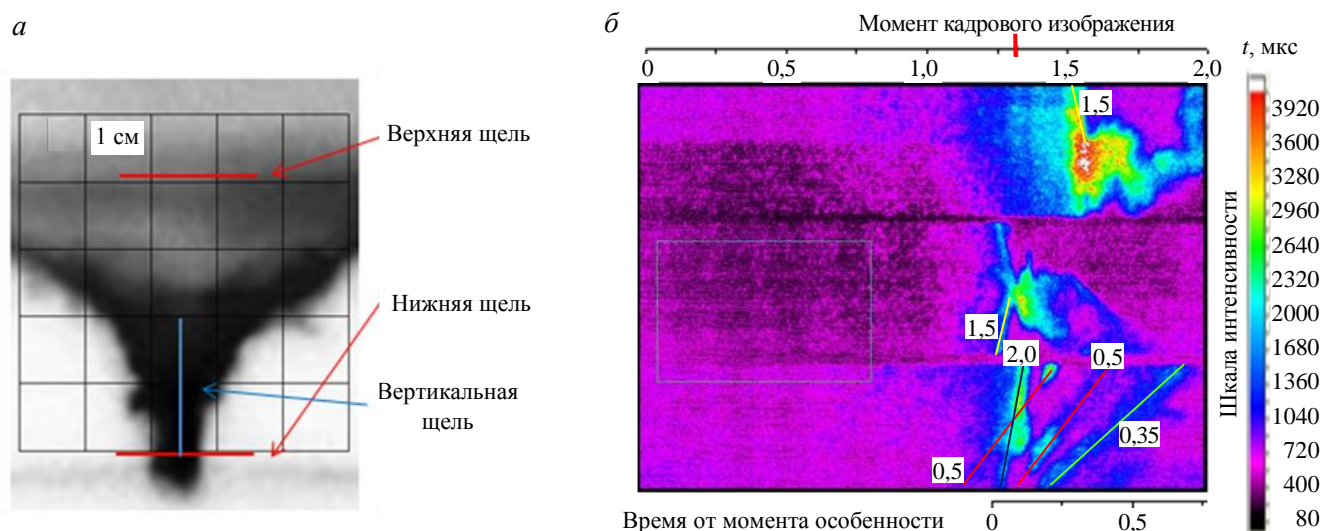


Рис. 9. Кадровая фотография (–50 нс до особенности на производной тока, экспозиция 10 нс) (а) и щелевая развёртка (б) в одинаковом пространственном масштабе, рабочий газ Ne; а — схема расположения щелей (красным обозначены щели радиальных развёрток, синим — аксиальной); б — верхняя развёртка (поперёк оси, высота 4,5 см над анодом, средняя развёртка — поперёк оси, высота 0,5 см над анодом, нижняя развёртка — вдоль оси 0,5—2,5 см над анодом). На развёртке изображение представлено в условных цветах, соответствующих различной интенсивности. Скорости, соответствующие наклонным маркерам, $\times 10^7$ см/с: V_1 (—); V_2 (—); V_3 (—); V_4 (—)

В экспериментах, когда щель располагалась на уровне 8,5 см выше плоскости анода, также видно появление свечения в момент формирования пинча у анода (рис. 10). В течение 300—350 нс интенсивность практически не меняется, после чего начинает постепенно возрастать. Ещё спустя 150 нс происходит резкое увеличение интенсивности с выраженной временной и пространственной модуляцией, максимум сосредоточен в приосевой области. Наиболее вероятно, что это излучение вызвано достижением высоты 8,5 см потоками вещества.

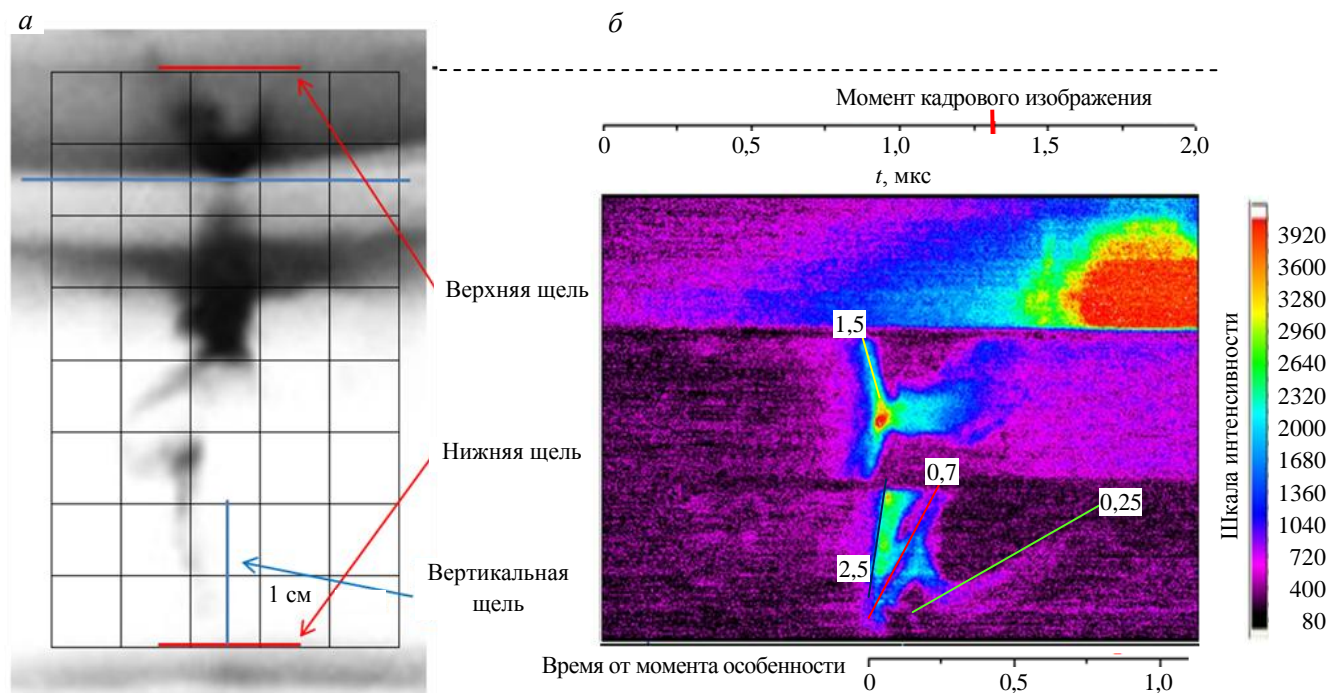


Рис. 10. Кадровая фотография (400 нс от особенности на производной тока, экспозиция 10 нс) (а) и щелевая развёртка (б) в одинаковом пространственном масштабе, рабочий газ Ne: а — часть изображения ниже зелёной горизонтальной линии закрыта дополнительным нейтральным светофильтром для увеличения динамического диапазона ЭОК, приведена схема расположения щелей (красным цветом обозначены щели радиальных развёрток, синим — аксиальной, верхняя развёртка — поперёк оси, высота 8,5 см над анодом, средняя развёртка — поперёк оси, высота 0,5 см над анодом, нижняя развёртка — вдоль оси 0,5—2,5 см над анодом); б — на развёртках изображение представлено в условных цветах, соответствующих различной интенсивности. Скорости, соответствующие наклонным маркерам, $\times 10^7$ см/с: V_1 (—); V_2 (—); V_3 (—); V_4 (—)

Далее (через 600—700 нс после формирования пинча у анода) интенсивность излучения возрастает до максимального регистрируемого значения, что связано с достижением этой высоты плазмой ТПО. На переднем фронте излучения видна компактная (0,2—0,4 см) интенсивная область. Скорость, определяемая по задержке излучения на радиальной развёртке относительно момента формирования пинча, составляет порядка $(1,1—1,3)10^7$ см/с, что совпадает с значениями для сечения 4,5 см над анодом. Интенсивность излучения резко падает по радиусу (поперечный размер области $\sim 1—2$ см, при этом интенсивно излучающая область не превосходит 1 см).

На развёртке, полученной на удалении 8,5 см от анода (см. рис. 10), наблюдаются потоки, опережающие поднятие ТПО, что полностью соответствует данным численного моделирования. Ранее потоки над уровнем ТПО наблюдались [18], однако чёткой взаимосвязи образований на скоростных кадровых изображениях с процессами динамики пинча не было. Этот результат был получен впервые.

Наблюдение потоков во всём анод-катодном промежутке. Как отмечалось, для увеличения области наблюдений нами была применена схема регистрации, позволяющая исследовать динамику плазмы на всём межэлектродном промежутке. Примеры развёрток, полученных в такой схеме,

показаны на рис. 11. Увеличение поля зрения позволило нам более чётко разделить фазы пинчевания с преобладанием «зиппер-эффекта», формирования плазменного потока и аксиального движения ТПО. Увеличение высоты пинча за счёт «зиппер-эффекта» происходит со скоростью более $3 \cdot 10^7$ см/с. Скорость резко снижается после достижения пинчем высоты ~ 3 см, что объясняется изменением угла наклона оболочки (см. таблицу). Влияние «зиппер-эффекта» проявляется вплоть до достижения пинчем

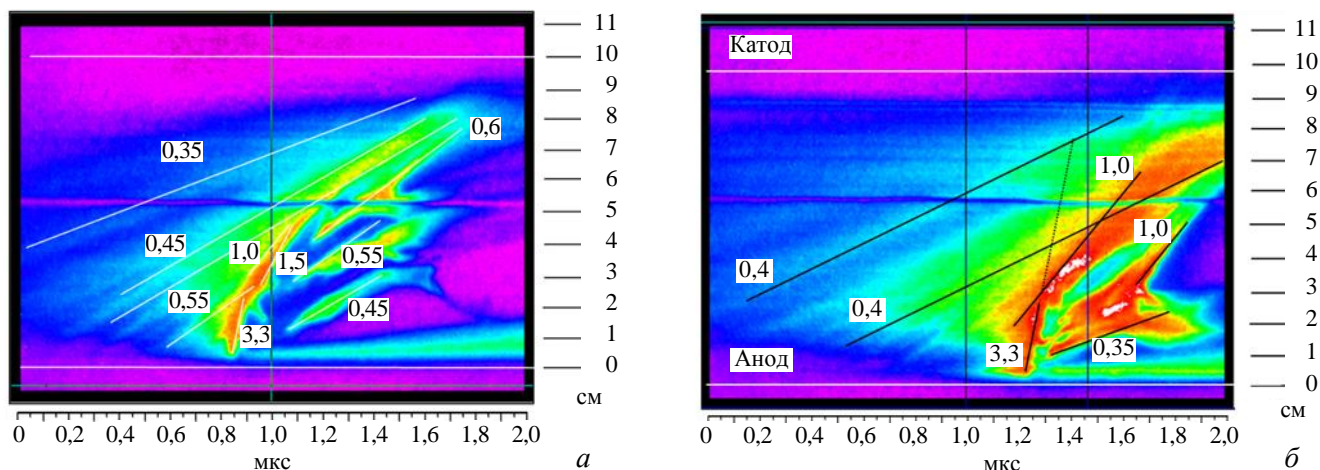


Рис. 11. Щелевые развёртки, ориентированные вдоль оси и соответствующие области до 10 см над анодом. Рабочий газ Ne. Изображения представлены в условных цветах, соответствующих различной интенсивности. На рисунке обозначены уровни анодного и катодного электродов. Указаны скорости ($\times 10^7$), определённые по наклону фронтов на развёртках. Последовательные разряды: *a* — чувствительность ниже; *б* — выше

высоты ТПО (угол наклона близок к 90°). После этого увеличение высоты пинча происходит со скоростью подъёма ТПО под действием давления магнитного поля и составляет около $0,4 \cdot 10^7$ см/с. На этом фоне уже можно выделить плазменные потоки, распространяющиеся со скоростью $\geq 1 \cdot 10^7$ см/с.

Существенно, что на развёртках наблюдается довольно интенсивное излучение в области до 5 см ещё до прихода ТПО на ось. Возможно, это связано с вытеснением газа, частично ионизованного излучением оболочки из области пинчевания, ещё на стадии схождения ТПО к оси. Важным следствием этого является то, что сформировавшиеся в стадии пинчевания потоки распространяются в уже ионизованной среде.

В работе [21] при другой форме катодного электрода были получены хронограммы, демонстрирующие схожую динамику. При пространственно-временном масштабировании развёртки, показанной на рис. 12, и

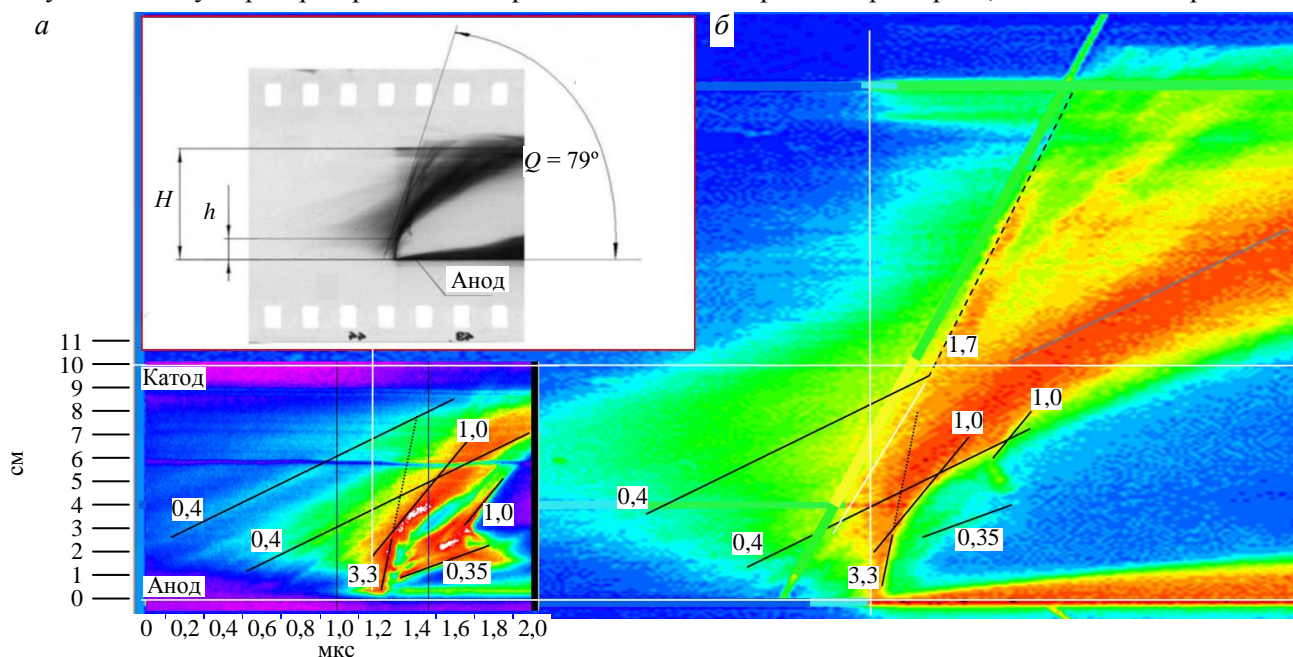


Рис. 12. Совмещённые развёртки из работы [21] (*a*) и полученная в наших экспериментах (*б*). Изображения представлены в условных цветах, соответствующих различной интенсивности. Щель расположена на оси установки. Развёртки представлены в одинаковом пространственно-временном масштабе. Оригинальная развёртка показана сверху (*a*): $h \sim 3$ см — высота пинча над поверхностью анода; $H = 22$ см — область наблюдения, ограниченная межэлектродным расстоянием анод—катод (верхняя крышка разрядной камеры). Указаны скорости ($\times 10^7$), определённые по наклону фронтов на развёртках

представлении в условных цветах, соответствующих различной интенсивности, оказывается удобно и наглядно сравнить результаты, полученные с разницей в 15 лет при различных параметрах разряда и геометрии разрядной системы (рис. 13). Обе развёртки удивительно похожи как по характеру динамики, так и по характерным скоростям.

На развёртке, имеющей большее поле зрения (черно-белый цвет, см. рис. 13), в области выше 10 см над анодом отчётливо наблюдается разделение потоков с различными скоростями. Выше этого уровня (10 см) пространственно разделяются плазменные потоки, распространяющиеся со скоростью $>1,0 \cdot 10^7$ см/с, и плазма ТПО, поднимающаяся с характерной аксиальной скоростью $0,4 \cdot 10^7$ см/с. Максимальная скорость, определённая по углу наклона развёртки (выше уровня 10 см), составила $\sim 2 \cdot 10^7$ см/с. Однако на развёртке также наблюдается аксиальный поток, распространяющийся со скоростью $1,3 \cdot 10^7$ см/с (как и в наших экспериментах). Этот интересный факт позволяет предположить, что на малой пролётной базе (10 см) потоки, имеющие различные скорости, не успевают разделиться настолько явно в пространстве, чтобы их было удобно регистрировать. Интенсивно излучающие области, в том числе пинча, «маскируют» потоки вещества, излучающие в меньшей степени, и при этом многие процессы происходят одновременно, накладываясь друг на друга.

Важным выводом такого сопоставления является то, что в наших экспериментах также могут формироваться потоки со скоростями выше, чем мы регистрируем в анод-катодном промежутке, и оказываются «скрыты» другими процессами. Это заслуживает отдельного исследования и развития диагностических методов для уточнения наших предположений. К сожалению, в настоящее время геометрия установки ПФ-3 не позволяет проводить наблюдение выше катодного электрода.

В проведённых нами экспериментах наблюдается хорошее соответствие результатов, полученных при различных положениях времяанализирующей щели и различном поле зрения. Хорошее соответствие данных развёрток с разным полем зрения проиллюстрировано на рис. 13. На рис. 14 представлены сведённые развёртки и профили их интенсивности, полученные при различных положениях щели от плоскости

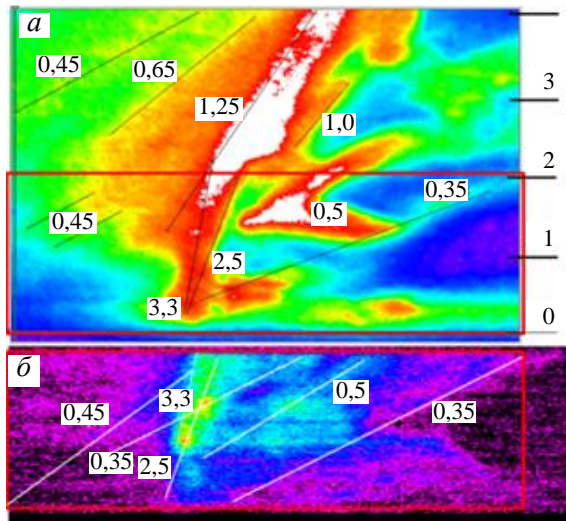


Рис. 13. Вертикально-ориентированные развёртки в одинаковом пространственно-временном масштабе: *a* — часть развёртки с большим полем зрения (см. рис. 11, 12), красной рамкой обозначена область, общая для двух разверток; *б* — с полем зрения 2 см (см. рис. 9, 10). Рабочий газ Ne. Указаны скорости ($\times 10^7$), определённые по наклону фронтов на развёртках

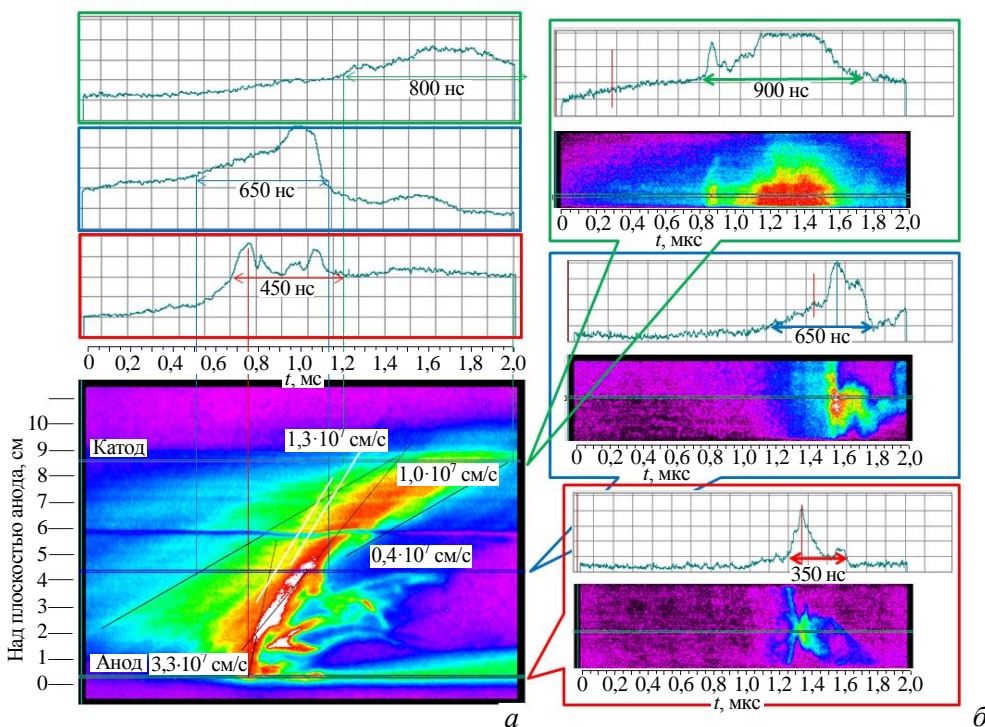


Рис. 14. Щелевые развёртки. Рабочий газ Ne. Изображения представлены в условных цветах, соответствующих различной интенсивности: *a* — щель развёртки расположена на оси установки, профиль интенсивности на высотах 0,5, 4,5 и 8,5 см; *б* — щели расположены горизонтально на высоте 0,5, 4,5 и 8,5 см над уровнем анодного электрода, профиль интенсивности на оси установки. Вертикальным красным маркером на всех профилях интенсивности обозначен момент образования пинча у анода

анодного электрода. Хорошее соответствие каждой пары временных профилей говорит в пользу того, что развёртки могут взаимно дополнять друг друга для построения объёмного распределения излучающих областей для лучшего понимания/иллюстрации динамики сжатия ТПО и формирования потоков плазмы.

В заключение следует отметить ещё один любопытный момент — различные диагностические методики при временах регистрации несколько десятков микросекунд показывали наличие второго потока вещества [8, 22], следующего за первым с задержкой около 30 мкс. Этому факту были предложены различные объяснения, но не уделялось значительного внимания, в том числе по причине второстепенности задачи при моделировании быстрых потоков. Одним из объяснений также может служить поднятие плазмы ТПО: на удалении 35 см от анода [8—10] наблюдаемые потоки имеют временную протяжённость 2 мкс и более при скорости $(0,4—1,0)10^7$ см/с, что соответствует длине потока более 10 см. Используя найденную в работе [11] зависимость скорости потока от пройденного расстояния, легко оценить, что на расстоянии 35 см, где регистрируются потоки, скорость быстрой части потока, имеющая скорость $(1,5—2,0)10^7$ см/с у анода, уменьшится до уровня $1 \cdot 10^7$ см/с, что будет формировать головную часть потока в экспериментах. Потоки, распространяющиеся со скоростью $\sim 1 \cdot 10^7$ см/с у анода, будут иметь скорости $(0,4—0,5)10^7$ см/с на расстоянии 35 см, что, возможно, формирует «тело» потока в экспериментах. На рис. 12 хорошо видно, что самое интенсивное излучение имеет поток, распространяющийся с характерной скоростью поднятия ТПО V_{\parallel} ; на высоте 35 см скорость этого потока должна упасть до значений $(0,7—0,9) \cdot 10^6$ см/с. Такая разность скоростей потоков приведёт к задержке относительно быстрых потоков на этом уровне порядка 30 мкс. Следовательно, наличие второго потока вещества в плазмофокусных разрядах, возможно, стоит связывать с аксиальным движением ТПО. Сферическая форма фронта, регистрируемая для второго потока в экспериментах [8], хорошо сочетается с такой трактовкой.

ВЫВОДЫ

До настоящего времени не было комплексной информации относительно особенностей формирования аксиальных потоков вещества при нецилиндрическом сжатии токонесущей оболочки в плазменном фокусе. В значительном количестве литературных источников факт формирования таких потоков связывался с эффектом кумуляции [23, 24] и признавался прямым следствием нецилиндричности ТПО [25] без оговорок на то, что кумуляция в привычном понимании возможна для несжимаемого вещества, коим нельзя считать плазму. В литературе не было приведено очевидных подтверждений в пользу того, в какой области и в какой момент формируются потоки. Также при исследовании процессов формирования потоков многие исследователи наблюдали второстепенные эффекты (например, формирование ударной волны [26—28]), но не выявляли самого потока.

Существенно, что на развёртках наблюдается довольно интенсивное излучение в области до 5 см ещё до прихода ТПО на ось. Возможно, это связано с вытеснением газа, частично ионизованного излучением оболочки из области пинчевания, ещё на стадии схождения ТПО к оси. Важным следствием этого является то, что сформировавшиеся в стадии пинчевания потоки распространяются в уже ионизованной среде.

Регистрация потоков, имеющих скорости выше, чем скорость поднятия ТПО, наглядно демонстрирует факт наличия потоков вещества (в ранних работах этот эффект не совсем корректно объяснялся кумуляцией), не связанных с динамикой ТПО вдоль оси. Вероятно, что они имеют природу, схожую с астрофизическими джетами, генерируемыми звёздными объектами, что даёт право использовать плазменный фокус при моделировании таких объектов.

При анализе и сравнении развёрток с различным полем зрения были получены основания считать, что измеряемые в экспериментах скорости $(1,3 \cdot 10^7$ см/с) потоков не отражают максимальных значений скоростей потоков (до $2 \cdot 10^7$ см/с), генерируемых в плазмофокусном разряде (в наших экспериментах). Проверка этого предположения заслуживает отдельного исследования и развития диагностических методов. К сожалению, в настоящее время геометрия установки ПФ-3 не позволяет проводить наблюдение выше катодного электрода. На фоне быстрого слабоизлучающего потока наблюдается аксиальное движение плазменного потока со скоростью около $1,0 \cdot 10^7$ см/с. Вероятнее всего, именно эти потоки вещества наблюдаются на значительном удалении от анода в виде компактных джетов.

За счёт комплексного подхода и использования нескольких диагностических методов получена информация, позволяющая построить объёмное распределение излучающих областей в анод-катодном промежутке в процессе формирования ПФ и его динамики с образованием аксиальных потоков вещества. Приведены закономерности, позволяющие устанавливать взаимосвязь между скоростями потоков, получаемых диагностическими методиками в различных направлениях. Полученные экспериментальные данные и их трактовка находят хорошее соответствие с численным моделированием

и классическими работами по физике плазменного фокуса и распространения плазменных потоков и, по мнению авторов, обобщают и объединяют их, что важно при постановке дальнейших экспериментов, использующих ПФ для моделирования джетов.

Работа поддержана грантами РФФИ № 14-02-01203-а, 14-29-06085_офи_м и 16-32-00917_мол_а.

REFERENCES

1. **Albertazzi B. et al.** — Science 17 October 2014, pp. 325—328.
2. **Suzuki-Vidal F. et al.** — J. of Physics, Conf. Series, 2014, vol. 511, p. 012050.
3. **Ciardi A.** — Lect. Notes Phys., 2010, vol. 793, pp. 31—50.
4. **Krauz V.I.** — In book: Encyclopedia of low-temperature plasma. Subject volume IX-2. High-energy plasmodynamics. — M.: YANUS-K, 2007, pp. 152—195 (in Russian).
5. **Krauz V. et al.** — Physica Scripta, 2014, т. 161, p. 014036.
6. **Krauz V. et al.** — In: 42nd EPS Conf. on Plasma Physics. Lisbon, Portugal, 22—26 June 2015, vol. 39E, p. 4.401.
7. **Mitrofanov K.N. et al.** — ZhETF (JETPh), 2014, vol. 146, issue 5(11), pp. 1035—1050 (in Russian).
8. **Krauz V.I. et al.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2013, vol. 36, issue 4 (in Russian).
9. **Krauz V.I. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2016, vol. 42, № 3, pp. 282—290 (in Russian).
10. **Krauz V.I. et al.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, vol. 39, issue 2, pp. 58—68 (in Russian).
11. **Krauz V.I.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 2, pp. 19—31 (in Russian).
12. **Anan'ev S.S. et al.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, issue 2, pp. 70—80 (in Russian).
13. **Mitrofanov K.N. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2010, vol. 36, № 11, pp. 997—1012 (in Russian).
14. **Grabovskii E.V. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2008, vol. 34, № 10, pp. 885—900 (in Russian).
15. **Filippov N.V. et al.** — 1998 ICPP & 25-EPS CCFPP.
16. **Anan'ev S.S. et al.** — Pis'ma v ZhETF (Letters to JETPh), 2010, vol. 92, № 11, pp. 817—822 (in Russian).
17. **Anan'ev S.S.** Dissertation for scientific degree of the cand. of phys.-math. sciences, Moscow, 2010 (in Russian).
18. **Kharrasov A.M. et al.** — Proceedings of XLII and XLIII conferences on plasma physics and CTF, 2015 and 2016, (in Russian).
19. **Filippov N.V. et al.** — Pis'ma v ZhETF (Letters to JETPh), 1973, vol. 18, № 3, pp. 199—202 (in Russian).
20. **Krauz V.I. et al.** — IEEE Trans. on Plasma Science, 2010, vol. 38, № 2, pp. 92—99.
21. **Filippov N.V. et al.** — Czech. J. Phys., 2000, vol. 50/S3, pp. 127—135.
22. **Anan'ev S.S. et al.** — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique), 2016, № 6, pp. 37—43 (in Russian).
23. **Filippov N.V. et al.** — In coll.: Fizika plazmy i problemy upravlyaemykh termoyadernykh reaktsiy (Plasma Physics and Problems of Controlled Nuclear Reactions), 1958, vol. 4, p. 170 (in Russian).
24. **Filippov N.V.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1983, vol. 9, p. 25 (in Russian).
25. **Filippov N.V. et al.** — Prikladnaya fizika (Applied physics), 1999, № 5, p. 43 (in Russian).
26. **Soto L. et al.** — Physics of Plasmas, 2014, vol. 21, p. 122703.
27. **Baronova E.O. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2012, vol. 38, № 9, p. 815 (in Russian).
28. **Polukhin S.N. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2016, vol. 42, № 12, pp. 54—60 (in Russian).

AUTHORS

Ananyev S.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Ananyev_SS@nrcki.ru

Krauz V.I. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Krauz_VI@nrcki.ru

Myalton V.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Kharrasov A.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia