

Моделирование формирования головной ударной волны нерелятивистских джетов на установках типа «Плазменный Фокус»

Введение

Лабораторное моделирование струйных выбросов молодых звездных объектов является одним из интенсивно развиваемых направлений. Хорошо известны работы по моделированию этих выбросов с помощью быстрых Z пинчей [1], мощных лазеров [2], плазменных пушек [3] и других устройств. Значительный прогресс в последнее время достигнут на установках типа «плазменный фокус» (ПФ) [4, 5]. Было показано, что на этих установках выполняются основные законы подобия, необходимые для моделирования астрофизических джетов, что обуславливает правомочность их использования в подобных экспериментах. Одним из достоинств моделирования с использованием ПФ систем является возможность исследования динамики параметров плазменных потоков при их распространении на значительные расстояния в среде, заполненной газом. Это позволяет моделировать динамический процесс формирования ударной волны в зависимости от контраста, скорости джета, распределения магнитных полей и др.

Масштабирование

Важнейшим условием успешного моделирования является, безусловно, соответствие лабораторного эксперимента реальным астрофизическим источникам. Это становится возможным благодаря отсутствию внутренних масштабов в уравнениях идеальной магнитной гидродинамики, что позволяет исследовать идентичные процессы на совершенно различных временных и пространственных масштабах.

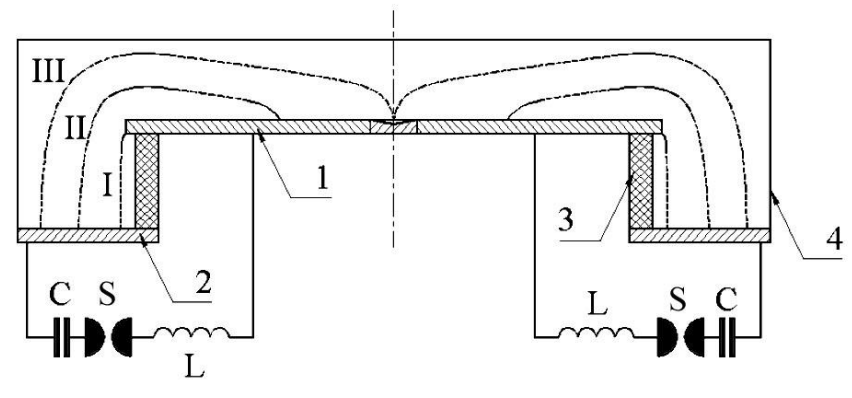
Таблица 2: Основные безразмерные параметры

	YSO		PF-3 (35 см над анодом)
Число Маха $M = v_{jet}/c_s$	10 – 50	> 1, сверхзвуковое течение	> 10 (для Ne и Ar)
Альфвеновское число Маха $M_A = v_{jet}/V_A$	~ 10 – 40		> 1
β ($4\pi P/B^2$)	$\ll 1$ около источника ~ 1 при 100 AU		~ 0.35 (для Ne и Ar)
число Рейнольдса $Re = LV/\eta$	$10^6 - 10^8$	$\gg 1$, вязкость не важна	$10^4 - 10^5$
магнитный Рейнольдс $Re_{cm} = LV/\eta_m$	~ 10^{15}	> 1, замороженное поле	~ 100
число Пекле $Pe = LV/\chi$	~ 10^6	> 1, конвективный перенос тепла	> 10^7
число Лундквиста $Lu = LV_A/\eta_m$	~ 10^{13}	> 1, диффузия поля мала	~ 10
контраст плотности (n_{jet}/n_{amb})	> 1		1 – 10

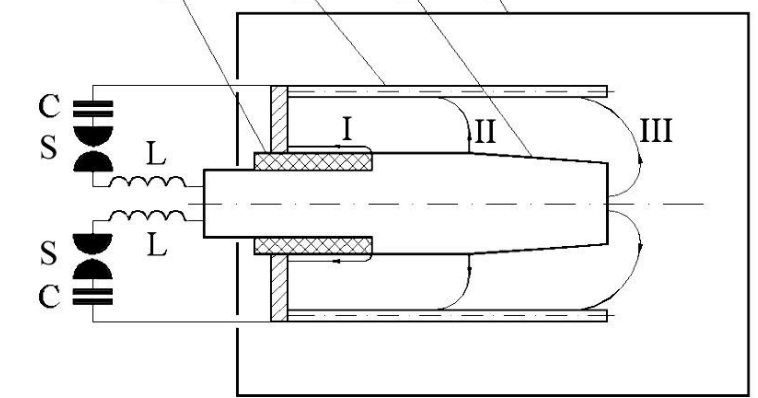
Таблица 1: Основные свойства экспериментальных установок

техн.	длина (см)	радиус (см)	время (μ s)	V (км c ⁻¹)	B (Гс)	I (МА)	n (см ⁻³)	T (эВ)
YSO	10^{17}	10^{15}	10^9 с	~ 100	10^{-4}		10^4	1
ПФ-3	100	10	~ 10	~ 100	10^4	2-3	10^{16}	1-5
PF-1000	пинч							
Феникс	пинч							
Caltech	10	1	5		10^3		10^{16}	2-4
MAGPIE	пинч	0,5	0,1	200	~ 10^5		10^{18}	3-5
LabJet	пинч	100	2-10	~ 10	30-80	~ 10^4	~ 10^{15}	1-20
LULI	лазер	0,2	0,01	0,001	90-200		~ 10^{18}	1,5
ЦНИИМаш	лазер	1	0,1	0,1	~ 100	~ 10^8	~ 10^9	1

Плазменный фокус



Конфигурация Филиппова



Конфигурация Мейзера

1 – анод, 2 – катод, 3 – изолятор, 4 – вакуумная камера, С – источник питания, L – внешняя индуктивность, S – разрядник. I – фаза пробоя; II – фаза ускорения; III – фаза плотного плазменного фокуса

После предварительной откачки камера заполняется рабочим газом (H₂, D₂, He, Ne, Ar и их смеси) под давлением в несколько Торр. После подачи напряжения конденсаторной батареи на электроды разрядной системы в области изолятора формируется токнесущая плазменная оболочка (ТПО), которая под действием сил Ампера движется к торцу анода и затем сжимается к оси с образованием пинча. Формирование пинча сопровождается диссипацией накопленной в цепи магнитной энергии и появлением пика на производной разрядного тока. На рисунке показаны последовательные положения ТПО и область формирования пинча. Пинч является источником различных излучений, в том числе плазменных потоков, распространяющихся со сверхзвуковой скоростью вдоль оси системы и являющихся основным объектом наших исследований. Существенного расширения диапазона экспериментальных условий можно добиться путем создания профилированных газовых распределений с помощью импульсного напуска газа. При этом начальное газовое распределение будет определяться областью дополнительной инжекции.

Экспериментальная база

Лабораторное моделирование струйных выбросов молодых звездных объектов было инициировано в НИЦ «Курчатовский институт» Е.П. Велиховым. Эксперименты проводятся на установке ПФ-3 (плазменный фокус типа Филиппова), крупнейшей в мире установке этого класса. В последнее время в рамках проектов РФФИ развивается широкое международное сотрудничество. Эксперименты проводятся также на установках PF-1000U (Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза, Варшава) и КПФ-4 «Феникс» (ГНПО СФТИ, Сухум).



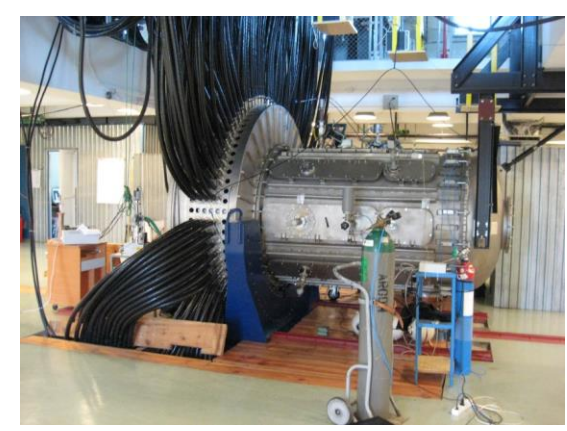
ПФ-3

НИЦ «Курчатовский институт»



КПФ-4 «Феникс»

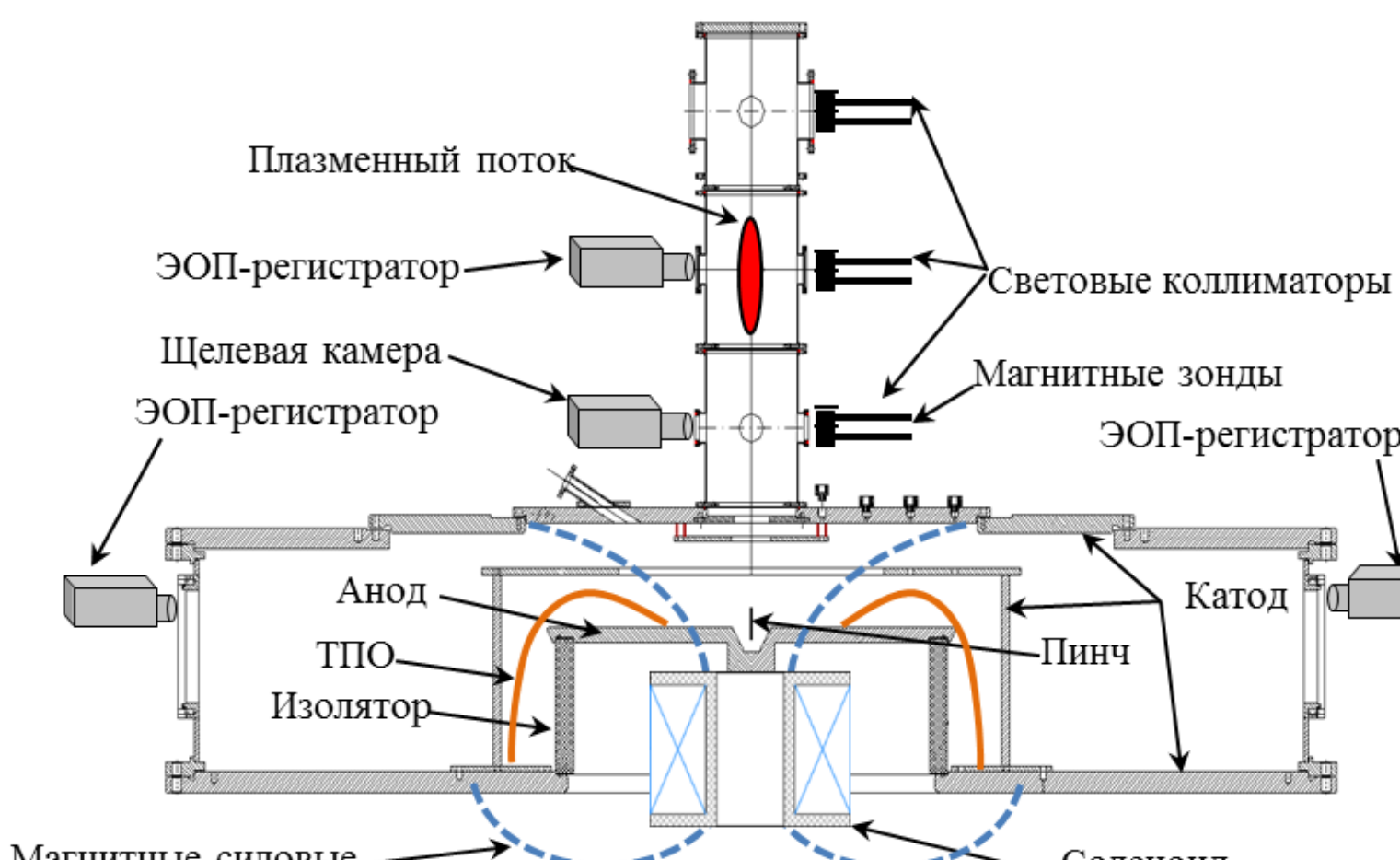
СФТИ, Сухум



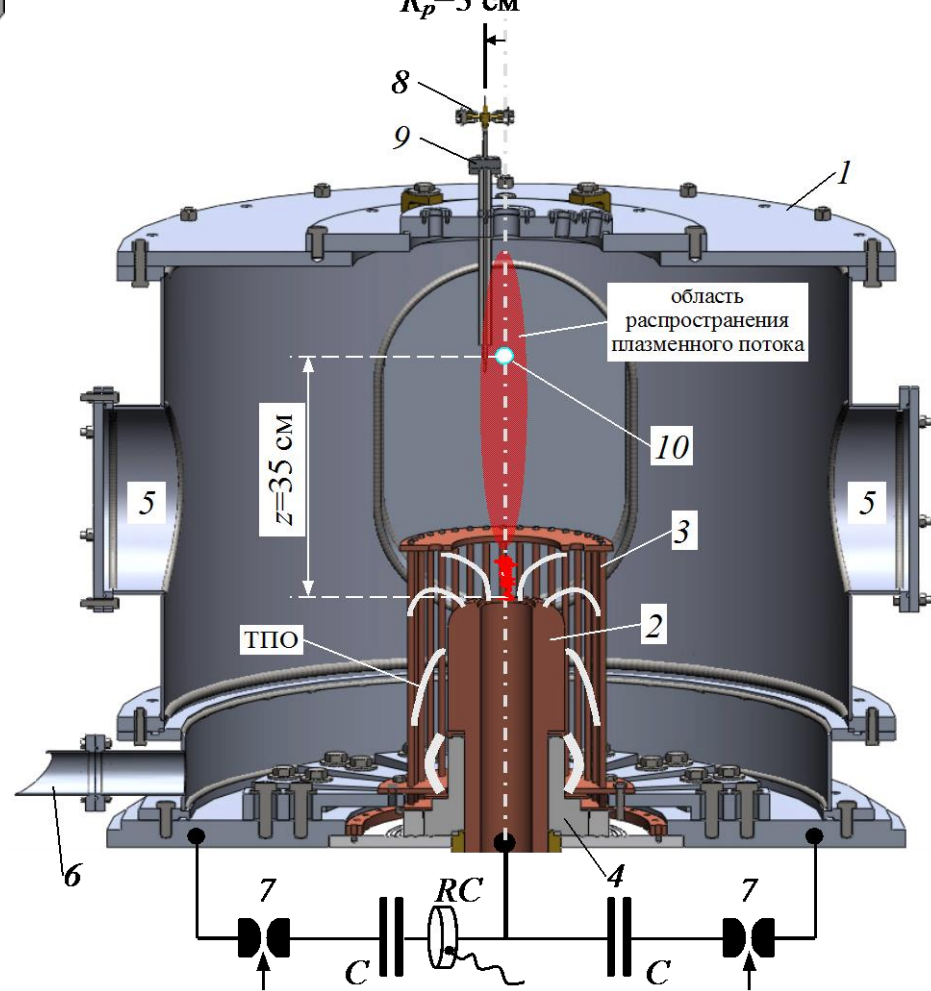
PF-1000U

IPPLM, Warsaw

Схема эксперимента



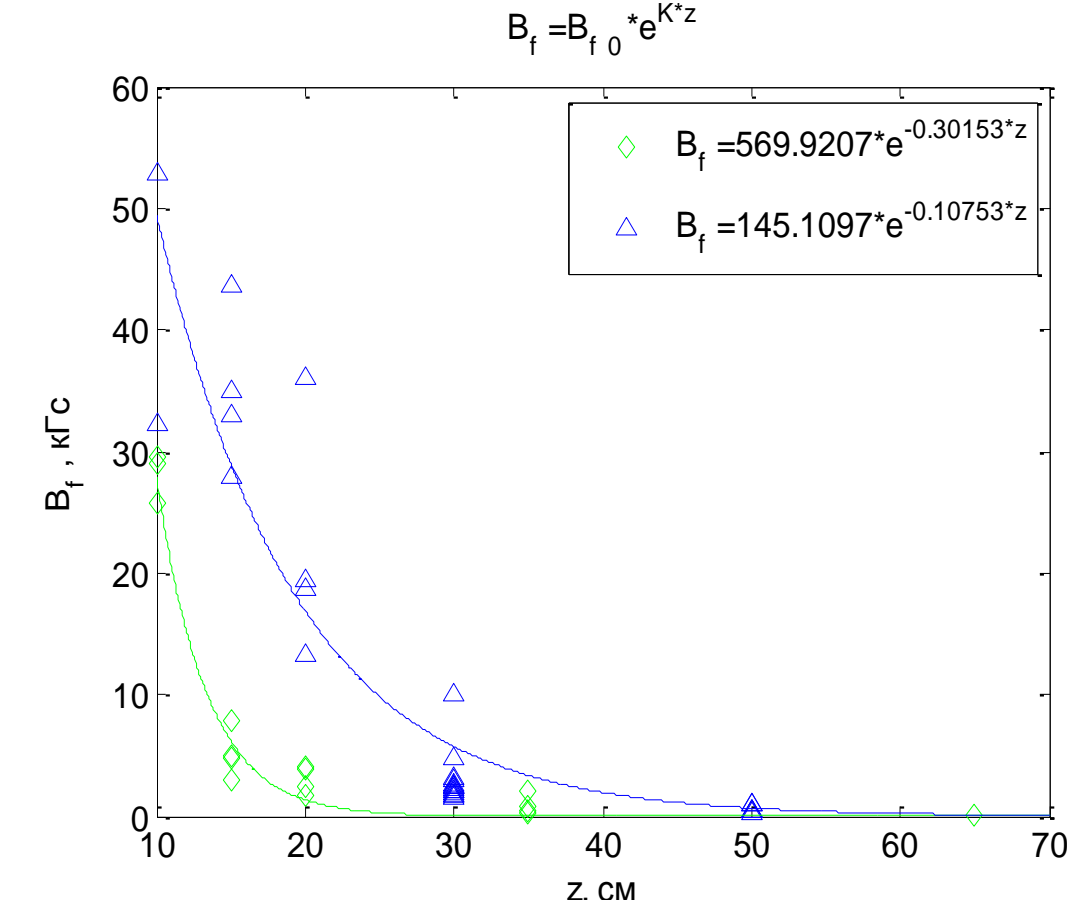
Установка ПФ-3. Для исследования потоков применена трехсекционная пролетная камера с диагностическими патрубками, что позволило исследовать динамику плазменного потока при его распространении на расстояния ≥ 100 см



КПФ-4: 1 – вакуумная камера; 2 – анод; 3 – катод; 4 – изолятор; 5 – диагностические окна; 6 – патрубок вакуумной откачки; 7 – разрядники; С – батарея установки; RC – пояс Роговского; 8 – магнитный зонд; 9 – вакуумный ввод для магнитного зонда; 10 – оптический коллиматор.

PF-1000U: используется осевая инжекция газа в область формирования пинча

Эксперименты с внешним полоидальным полем

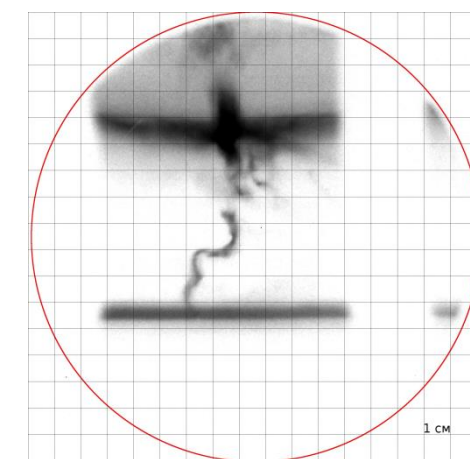


Выполнены эксперименты с внешним полоидальным полем в области пинчевания. За счет сжатия магнитного потока при схлопывании ТПО к оси величина поля в момент генерации потока может составлять ~ 10 Тл. Показано, что в случае наложения внешнего полоидального магнитного поля наблюдается значительное увеличение не только захваченного полоидального поля, но и тороидального, что может быть связано, в частности, с вращением плазменного потока.

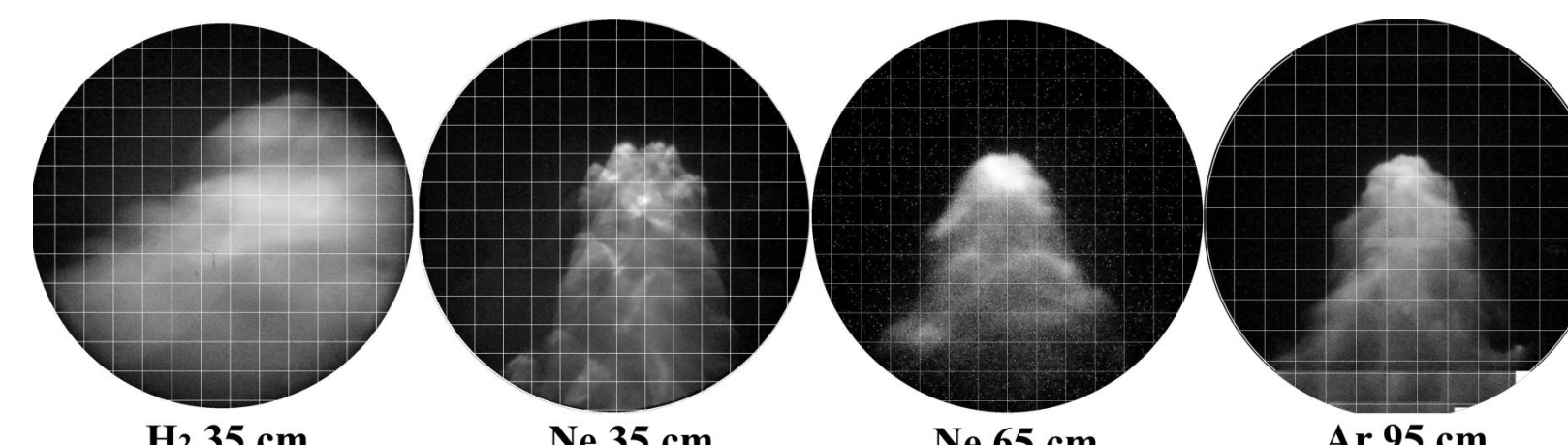
Зависимость величины азимутального магнитного поля от расстояния от анода без внешнего полоидального поля (Δ) и с внешним наложенным полем (\diamond)

Результаты экспериментального моделирования

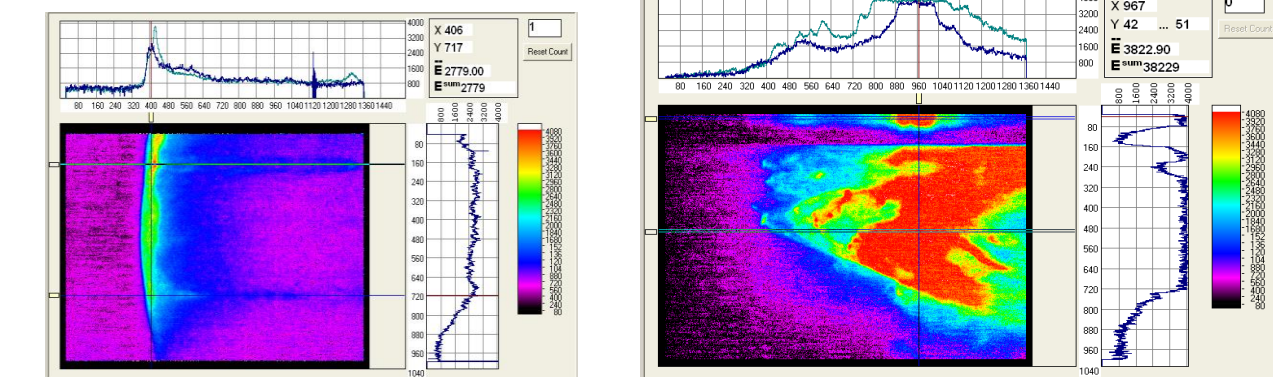
Плазменный поток в ПФ-разряде формируется во время пинчевания токнесущей плазменной оболочки на оси системы на стадии развала пинча и далее движется в фоновой плазме со скоростью примерно 10^7 см/с. В отличие от разряда в водороде, при разряде в неоне и аргоне сохраняется компактность головной части плазменного потока при его распространении на значительные расстояния, что свидетельствует о важной роли радиационного охлаждения



Формирование потока в прианодной области установки ПФ-3. Масштаб 1 см

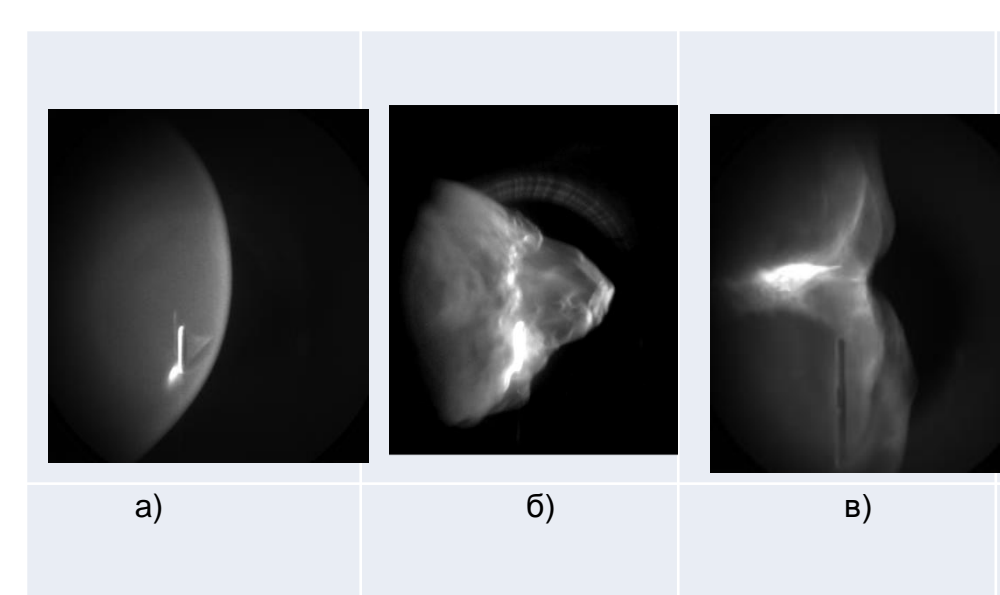


Фотографии головной части потока на различных расстояниях в различных газах на установке ПФ-3. Масштаб 1 см



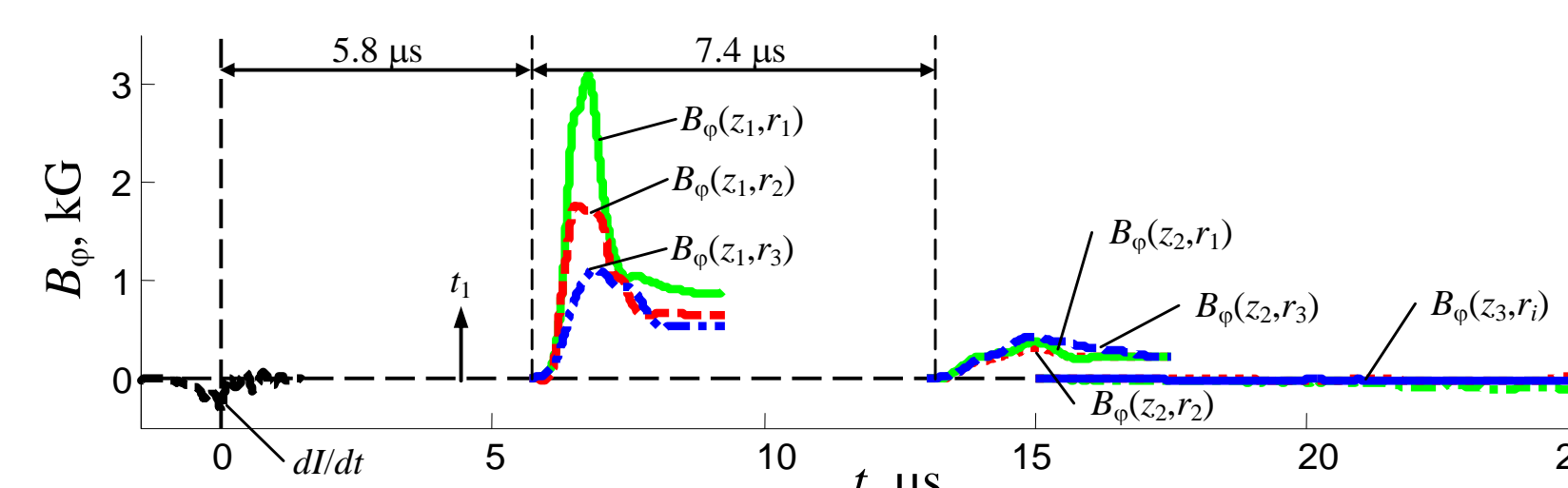
Щелевые развертки плазменного потока при разряде в водороде (слева) и в аргоне (справа) на установке КПФ-4 [6]. Длительность развертки 6 мкс

Фотографии головной части плазменного потока на расстоянии 40 см от анода. Установка PF-1000U



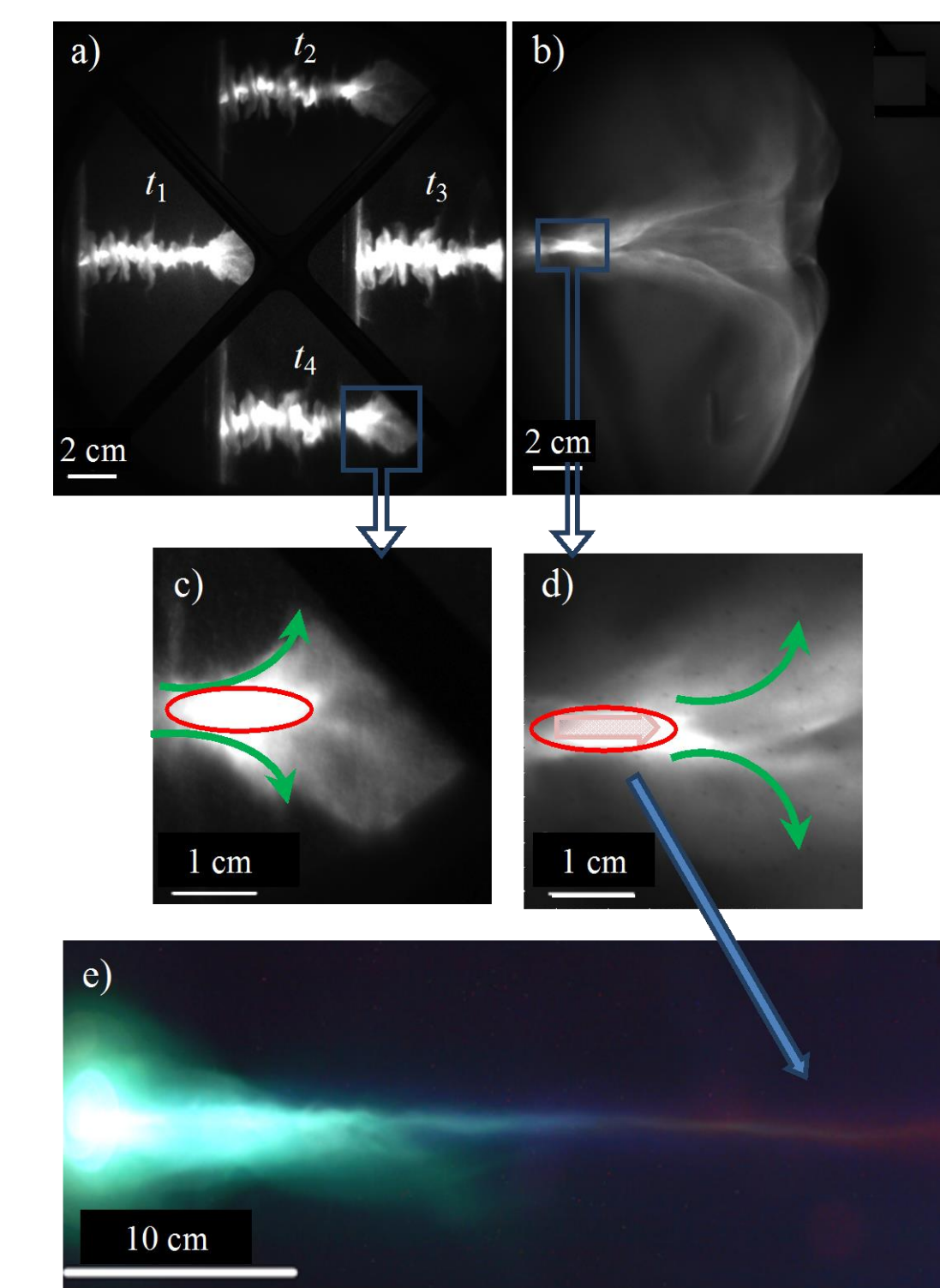
Стационарный напуск дейтерия (а), неона (б) и стационарный напуск D₂ и импульсная инжекция Ne на рис. (а) виден магнитный зонд

Измерения магнитных полей

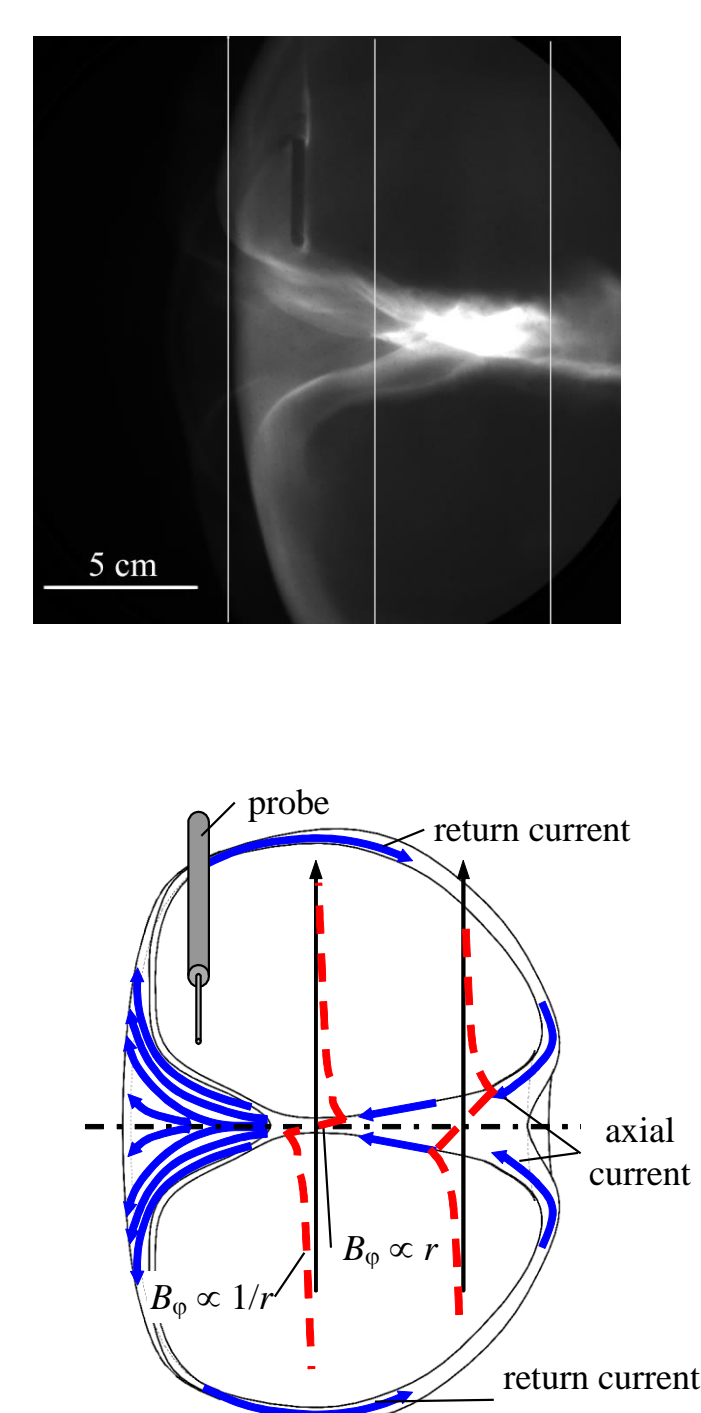


Результаты измерений тороидального магнитного поля в плазменной струе на расстояниях $z_1=40$ см, $z_2=60$ см и $z_3=74$ см от поверхности анода установки PF-1000U на радиусах 3 см, 4,5 см и 6 см. Спад магнитного поля с увеличением радиуса соответствует протеканию продольного тока в присоединенной зоне. Наблюдается также диссипация магнитного поля по мере удаления от анода.

Сценарий формирования и динамики потока в режиме импульсной инжекции неона.

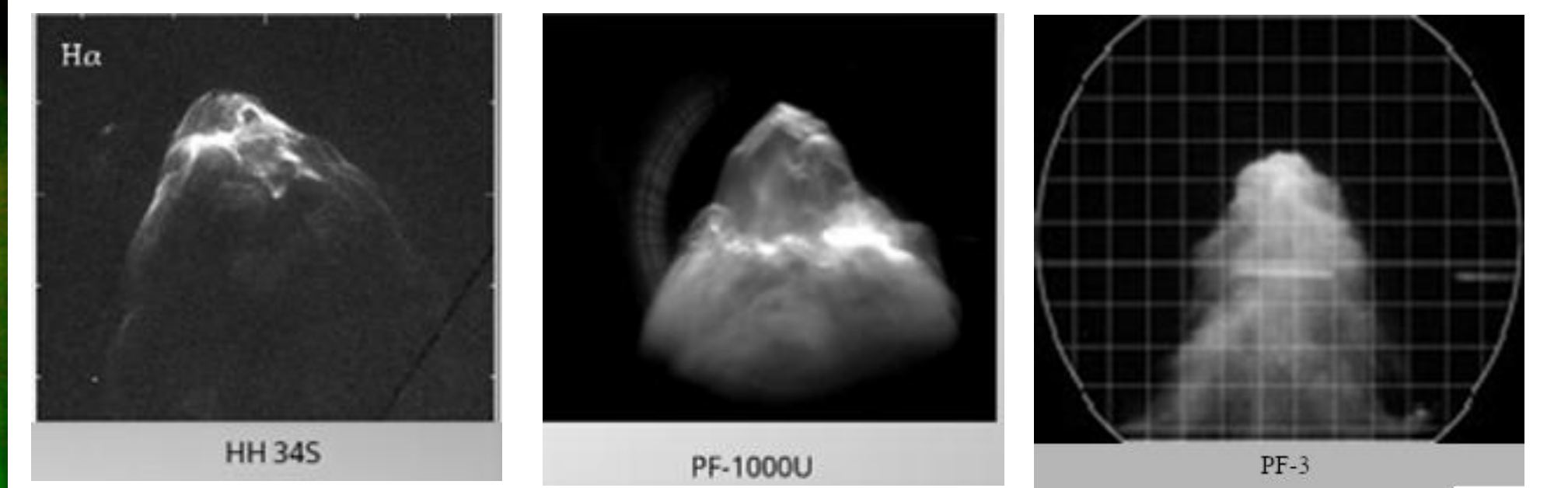


Модель головной части плазменного потока



Последовательные фотографии области пинчевания в рентгеновском диапазоне (а), и области генерации потока в увеличенном масштабе (б); Фотография потока в видимом спектре на расстоянии 40 см от анода (в) и его ядра в увеличенном масштабе (г), а также интегральная во времени фотография плазменного потока в видимом спектре (д). Стрелками показаны направление осевого тока и токов замыкания. [7].

Объект HH34 и его головная часть и фотографии головных частей плазменных потоков на установках PF-1000U и ПФ-3 при разряде в неоне



Выводы

- Установки типа «плазменный фокус» могут быть успешно использованы при моделировании динамики джетов молодых звездных объектов.
- При распространении плазменного потока в фоновом газе формируется ударная волна, близкая по форме к головным ударным волнам реальных астрофизических объектов.
- Исследована структура головной части потока и построена феноменологическая модель плазменного выброса с токами замыкания.
- Показано, что изменением условий эксперимента можно воздействовать на форму и структуру потока, что открывает возможность исследования влияния различных факторов (радиационное охлаждение, магнитные поля, плотность и распределение окружающего газа и др.) при моделировании астрофизических джетов.

Литература

1. S. V. Lebedev, A. Frank, D.D. Rutov. *Rev. Mod. Phys.* **91** (2019), 025002
2. B. Albertazzi et al, *Science* 17 October (2014): 325
3. P. M. Bellan, *J. Plasma Phys.* **84**, 755840501
4. V. Krauz et al., *Physica Scripta*, **T161** (2014) 014036
5. V. I. Krauz, V. S. Beskin and E. P. Velikhov., *IJMPD*, **27** (2018) 1844009
6. D. A. Voitenko et al. *Plasma Physics Reports*, **43**, (2017) 1132
7. V.I. Krauz et al., *EPL*, **129** (2020) to be published

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-29-21006_мк и № 17-02-01184-а).