

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА ПЛАЗМЫ С РАЗРЕШЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

© 2024 г. А. Д. Ярошевская^{a,*}, К. М. Гуторов^a, В. Л. Подковыров^a, Ю. И. Литвиненко^a

^aГосударственный научный центр РФ «Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований», Троицк, Москва, Россия

*e-mail: YaroschAD@triniti.ru

Поступила в редакцию 08.12.2024 г.

После доработки 12.03.2024 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

Описаны аппаратура и метод измерения скорости потока плазмы квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя (КСПУ) на основе высокоскоростной спектроскопии доплеровского сдвига. Дискретизация измерений по времени может достигать 100 кГц, что позволяет подробно исследовать процессы длительностью порядка 1 мс и более. Продemonстрировано согласие значений скорости потока, полученных методом спектроскопии доплеровского сдвига и времяпролетным методом. Представлены результаты измерений, показывающие, что скорости плазменного потока КСПУ лежат в диапазоне 30–160 км/с в зависимости от энерговклада в разряд и состава рабочего газа.

Ключевые слова: скорость плазмы, эффект Доплера, КСПУ, ЭРД

DOI: 10.31857/S0367292124060043, **EDN:** PTANQZ

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» ведется разработка прототипа электроракетного двигателя (ЭРД) с повышенными параметрами тяги и удельного импульса на основе квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя (КСПУ). Установка и методы исследования интегральных характеристик разряда и потока плазмы представлены в работе [1]. Для определения скорости плазменного потока очевидное решение — применение спектроскопии доплеровского сдвига. Типичные параметры эксперимента — использование легких плазмообразующих газов (водород, гелий), скорость потока ~ 100 км/с, температура до 2 эВ, концентрация от $3 \cdot 10^{14}$ до 10^{16} см⁻³, мгновенная мощность разряда от 3 МВт, длительность разрядного импульса ~ 1 мс. В указанных условиях возможно проводить спектроскопические исследования с применением промышленно изготавливаемого оборудования. Характерные примеры определения направленной скорости для водорода и гелия можно найти в работах [2–5]. Особенностью условий представленного исследования является необходимость высокоскоростной съемки при кадровой регистрации спектров для отслеживания изменений скорости во время разряда, что отличает технику эксперимента от известных методов с короткой экспозицией одиночного кадра с применением электронно-оптического преобразователя или

регистрацией быстрых процессов с применением камер с шелевой разверткой [5, 6].

Ключевая характеристика ЭРД — скорость выбрасываемого потока, поэтому при разработке нового объекта техники желательно применять несколько независимых методов ее определения. В представленных экспериментах используется дублирующая диагностика скорости на базе времяпролетной методики, которая дает надежные результаты при наличии хорошо выделяемых движущихся объектов, например, отдельных сгустков или фронта распространения плазмы [7, 8]. В работе [9] описывается определение скорости плазмы КСПУ времяпролетным методом при регистрации движения ярких участков плазменного потока по схеме с временной разверткой щели, ориентированной вдоль направления потока. В работе [10] показано, что в плазменном потоке КСПУ области яркого свечения соответствуют участкам потока с повышенной концентрацией плазмы и сохраняются на расстояниях свыше 1 м от среза электродов ускорителя. Движение таких сгустков плазмы можно отслеживать как посредством осциллографической регистрации излучения потока, так и методом хордовой интерферометрии электронной концентрации.

Настоящая работа посвящена реализации техники определения скорости плазменного потока методом спектроскопии доплеровского сдвига, позволяющей отслеживать изменения скорости в ходе разряда длительностью ~ 1 мс. Проводится сравнение результа-

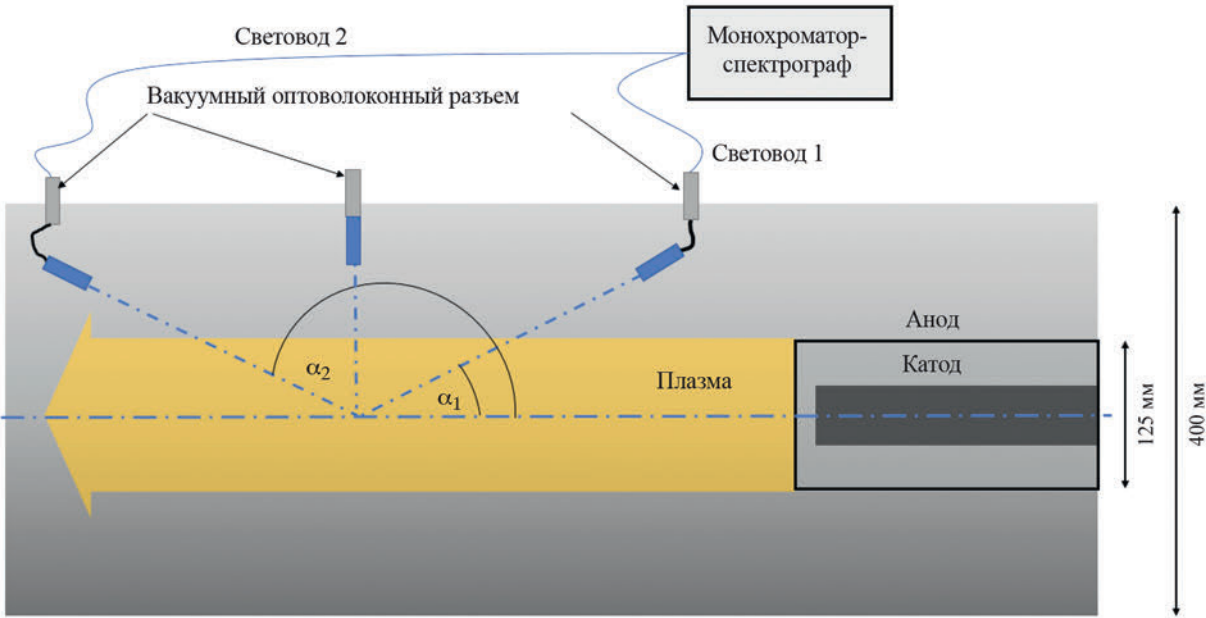


Рис. 1. Общая схема эксперимента.

тов с данными, получаемыми времяпролетной методикой, и исследуется скорость потока для водорода, дейтерия и гелия при различном уровне вклада мощности в разряд.

2. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Регистрация линий свечения частиц плазменного потока при наблюдении вдоль направления движения позволяет определять скорость частиц по доплеровскому сдвигу регистрируемых линий. При наблюдении набегающего потока линия будет смещаться в коротковолновую область, а для убегающего — в длинноволновую. Схема эксперимента (рис. 1) подразумевает регистрацию излучения навстречу, вслед потоку и перпендикулярно потоку. В таком случае, относительный сдвиг линий имеет большую величину и лучше различим, что повышает точность измерений. При наблюдении под углами α_1 и α_2 суммарное смещение линий $\Delta\lambda$ определяется выражением

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{u}{c} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2),$$

где λ_0 — исходная длина волны, c — скорость света, u — скорость движения частиц в потоке.

Регистрация спектральных линий реализована на основе монохроматора-спектрографа M522i, построенного по оптимизированной схеме Черни–Тернера с компенсацией aberrации астигматизма. Основные характеристики прибора: фокусное расстояние 522 мм, относительное отверстие 1/6.7, используемая дифракционная решетка 2400 штрихов/мм в первом порядке дифракции, ширина инструментального контура 0.03 нм при ширине щели 15 мкм. Обратная линейная дисперсия для ряда длин волн приведена в табл. 1.

Излучение собиралось коллиматорами FA-2 из кварца с диаметром окна 15 мм, расположенными внутри вакуумного объема, и вводилось в оптоволоконные кабели. Переход оптоволоконка из вакуума в атмосферу осуществлялся через вакуумные оптоволоконные вводы VFT-400-SR. Далее излучение на щель спектрометра заводилось посредством волоконной сборки BFL44HS01, которая собирает четыре оптоволоконка диаметром 400 мкм в линию длиной 1.73 мм. Максимально возможно задействовать четыре направления наблюдения, как прави-

Таблица 1. Обратная линейная дисперсия для ряда длин волн

	Длина волны, нм					
	486	577	588	594	633	658
Обратная линейная дисперсия, нм/мм	0.564	0.476	0.464	0.458	0.410	0.376
Обратная линейная дисперсия, пм/пикс.	7.614	6.426	6.264	6.183	5.535	5.076
Диапазон в полном кадре, нм	15.6	13.2	12.8	12.7	11.3	10.4

ло это два навстречу потоку и по одному вслед и перпендикулярно потоку.

Размещение коллиматоров непосредственно в вакуумной камере вблизи оси распространения плазменного потока позволяет обеспечить максимально острый угол наблюдения, увеличивая разрешающую способность метода. Большинство экспериментов проведены в вакуумной камере диаметром 400 мм и диаметром анода ускорителя 125 мм, часть экспериментов проведена в существенно большей вакуумной камере диаметром 1.5 м при диаметре анода ускорителя 470 мм, во всех случаях общая длина вакуумной камеры для распространения пучка превышала 6 м. На практике вслед потоку удается реализовать наблюдение с углом α_1 близким 45° . Для наблюдения навстречу потоку нет существенных геометрических ограничений, но использование малых углов приводит к быстрой деградации или загрязнению защитного стекла коллиматора плазменным потоком. Экспериментально обычно реализовывались углы α_2 близкие к 140° и в ряде случаев 165° . Характерная величина сдвига длины волны в диапазоне 560–660 нм при наблюдении потока под углом 45° для скоростей 20–200 км/с лежит в диапазоне 37–440 пм (6–88 пикселей).

Регистрация спектров осуществлялась при помощи высокоскоростной видеокамеры Phantom 2640. Основные характеристики камеры: матрица 2048×1920 пикселей, размер пиксела 13.5 мкм, разрядность 12 бит, глобальный затвор, минимальная экспозиция 1 мкс, максимальная скорость съемки может составлять от 6600 до 300000 кадров в секунду в зависимости от выбранного размера кадра и режима работы матрицы. Квантовая эффективность находится в диапазоне 55–60% для излучения с длинами волн 480–650 нм.

Размер кадра может конфигурироваться исходя из размеров минимального блока матрицы, составляющего 128×8 пикселей. При сборе излучения от четырех оптоволокон требуемая высота кадра составляет не менее 144 пикселей, минимальная высота для регистрации двух оптоволокон — 72 пикселя. Минимальная требуемая ширина кадра 256 пикселей, что при граничной рабочей длине волны для применяемой решетки в 675 нм дает покрытие кадром диапазона 1.28 нм, достаточное для регистрации доплеровского сдвига на скорости до 200 км/с. Максимальная частота регистрации составляет 120 000 кадров/с для этих параметров, что дает около 120 отсчетов скорости на протяжении импульса.

Ключевой момент в построении системы регистрации — стыковка камеры с выходным портом монохроматора-спектрографа. Основная задача — расположить матрицу в плоскости изображения спектрального прибора и добиться одинакового положения спектральных линий для всех оптоволокон. Доплеровский сдвиг определяется на основе положения центра спектральной линии для каждого канала

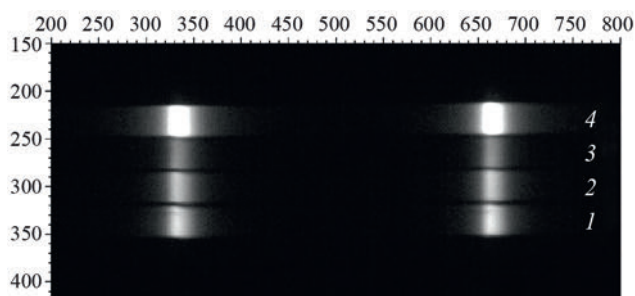


Рис. 2. Изображение с камеры при настройке по желтому дублету ртути, линия 576.96 нм лежит справа, а линия 579.07 нм — слева. Цифрами указаны полосы наблюдения.

ла наблюдения. Проверка обратной линейной дисперсии и точности выравнивания матрицы проведена при регистрации желтого дублета ртути, источник излучения — ртутная лампа высокого давления. Участок изображения с камеры приведен на рис. 2, по осям отложены пиксели, длина волны возрастает справа налево (линия 576.96 нм лежит правее, а линия 579.07 нм — левее). Расстояние между линиями 330 пикселей, характерная высота полосы, соответствующей каждому световоду, составляет 30 пикселей. Экспериментально наблюдаемое расстояние между линиями полностью соответствует указанной обратной линейной дисперсии.

Дальнейшая обработка заключалась в усреднении спектров для каждой полосы по 17 центральным пикселям. Результаты построения профилей для полос 1 и 4 приведены на рис. 3. Для всех пиков была проведена аппроксимация распределением Фойгта, давшая практически идентичные результаты — ширина по Лоренцу 0.14 нм, ширина по Гауссу 0.07 нм, погрешность определения центра не более 0.5 пм. На основании разницы между положениями центров ли-

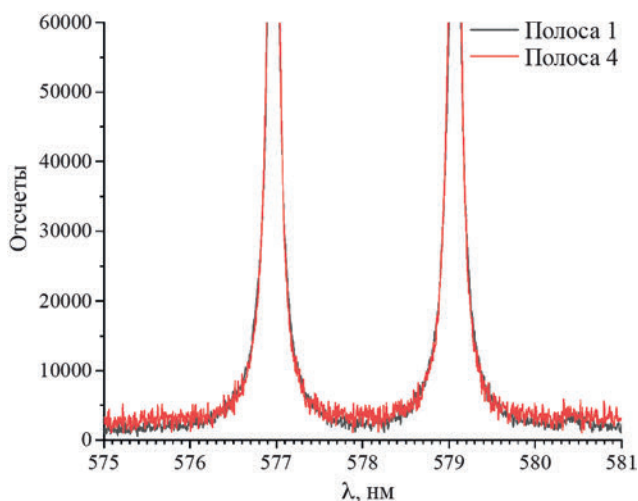


Рис. 3. Профили линий желтого дублета ртути для полос 1 и 4 с рис. 2.

ний для разных полос, составившей менее 1 пм, можно утверждать, что камера установлена с максимально возможной точностью — до одного пикселя.

В эксперименте точность определения доплеровского смещения фактически будет определяться точностью определения центра наблюдаемой линии. По приведенным данным можно сказать, что для узких линий с шириной на полувысоте до 0.1 нм точность определения центра по профилю линии находится на уровне 1 пм, что соответствует погрешности определения скорости до 1 км/с. При определении центра по положению максимума точность составит 1 пиксел (5–7 пм в зависимости от длины волны), что соответствует погрешности определения скорости до 5 км/с. С увеличением ширины регистрируемых линий погрешность будет возрастать. Для линий с шириной на полувысоте от 0.2 нм точность определения центра по положению максимума не превышает 4 пикселей, что соответствует погрешности определения скорости до 15 км/с. Для решения задачи по определению скорости плазменного потока на уровне 100 км/с точности в 5 км/с вполне достаточно, что достигается даже простым способом определения максимума относительно узкой линии.

Эффективность сбора излучения влияет на интенсивность регистрируемой линии. Узким местом для сбора излучения на данный момент является узел стыковки оптоволокон в входной щелью монохроматора-спектрографа — апертуры не согласованы и диаметр волокна существенно превышает ширину щели, что приводит к существенным потерям света. В случае нехватки света может снижаться точность определения центра линии, для компенсации чего потребуются увеличить время накопления кадра. На практике в широком диапазоне экспериментальных условий система регистрации успешно работала с временами накопления 1–10 мкс. Недостаток освещенности проявляется в области энерговклада в разряд ниже 40 кДж, которая также характеризуется низкими скоростями потока и не актуальна для текущих задач установки. В перспективе повышение эффективности сбора излучения может расширить экспериментальные возможности в части работы с минимальной экспозицией, уменьшения области сбора излучения, исследования динамики слабых линий в спектре.

3. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

Эксперименты проводились с водородом, дейтерием и гелием в качестве плазмообразующего газа. В случае водорода спектр содержит линии серии Бальмера, из которых наиболее предпочтительна H_{α} . Линия H_{β} подвержена интенсивному штарковскому уширению (характерные значения полуширины около 2 нм), следующие линии серии имеют низкую интенсивность. Однако в ходе экспериментов было об-

наружено, что профиль линии H_{α} имеет составной характер — кроме сдвинутой по доплеру части, соответствующей движению плазменного потока, существует существенная не сдвинутая часть, обусловленная свечением окружающего поток неподвижного газа. Пуски разряда проводились при остаточном давлении $(1-3) \cdot 10^{-4}$ мбар, что должно гарантировать отсутствие фона в области распространения потока. Наблюдаемое свечение неподвижного газа, видимо, вызвано эффектами предварительного заполнения вакуумного объема напускаемым газом до формирования плазменного потока и поступления газа в область разряда со стенок вакуумной камеры. По этой причине для измерения скорости потоков водородной или дейтериевой плазмы было решено использовать маркерную примесь.

В качестве маркерной примеси был использован гелий (добавлялся в количестве 10%), поскольку близок по массе к водороду и уже задействуется в эксперименте как рабочий газ. Для определения скорости как в указанной смеси газов, так и в чистом гелии, выбрана линия He I 587.56 нм, которая демонстрирует достаточно высокую интенсивность, и в ее окрестностях отсутствуют другие яркие линии спектра. Ширина на полувысоте составляет порядка 0.1 нм, что позволяет применять для определения скорости программный код [11] на основе поиска положения максимума линии, который в автоматическом режиме обрабатывает всю регистрируемую в пуске ускорителя серию кадров.

Переход к работе с маркерной линией He I 587.56 нм кардинально улучшил наблюдаемую картину по сравнению с линией H_{α} , позволив проводить эксперименты с автоматической обработкой спектров. Однако проблема с составным характером профиля линии не была устранена полностью — в ряде случаев также наблюдалось свечение покоящегося газа совместно со свечением потока, что иллюстрирует рис. 4. На рисунке изображены фрагменты кадров с камеры, размер фрагмента 298×158 пикселей, длина волны возрастает справа налево, красной линией отмечено положение центра несмещенной линии.

Полностью устранить явление свечения неподвижного газа при определении скорости потока удалось путем перехода к большой вакуумной камере с диаметром 1.5 м и применением модифицированной системы напуска газа в ускоритель, исключающей излишнее натекание в камеру до запуска разряда. В таких условиях линия H_{α} становится пригодной для диагностики. Также удобными для диагностики оказываются линии примесей, поступающих в плазменный поток с электродов ускорителя. В экспериментах наблюдались линии меди (материал электродов) и углерода (загрязнения, переосаждающиеся на электродах в результате плазменного воздействия на элементы внутри вакуумной камеры). Преимуществом линий примеси является меньшая ширина, обычно не

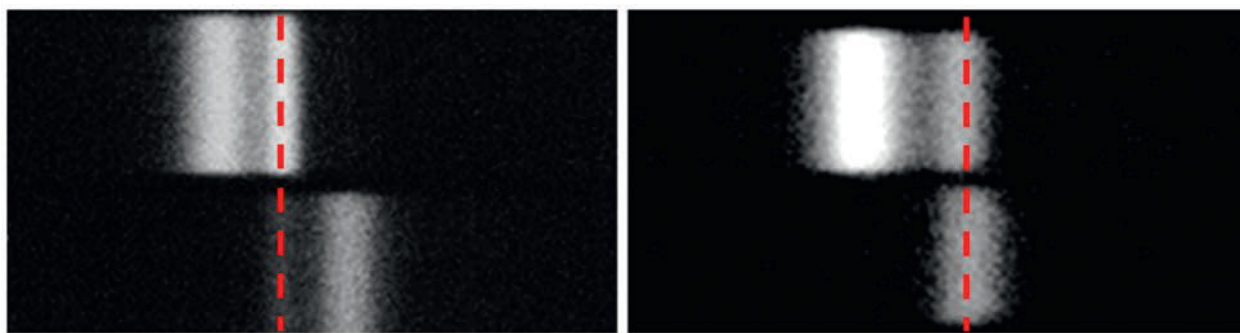


Рис. 4. Иллюстрация смещения линии He I 587.56 нм, вертикальная красная линия — центр без смещения, длина волны возрастает справа налево. Верхняя полоса — наблюдение вслед потоку, нижняя полоса слева — навстречу потоку, нижняя полоса справа — перпендикулярно потоку.

превышающая 0.09 нм, когда ширина H_{α} может достигать 0.16 нм. Пример регистрации линии примеси углерода приведен на рис. 5.

На вставке участок кадра с камеры отображен отраженным относительно вертикальной оси, чтобы длина волны возрастала слева направо, как это приведено для профилей линий. Задействованы все четыре направления наблюдения: 1 — перпендикулярно потоку, 2 — навстречу потоку (41°), 3 — навстречу потоку (15°), 4 — вслед потоку (46°).

В качестве дополнительного способа определения скорости потока плазмы была использована времяпролетная методика, базирующаяся на подходе, изложенном в работе [9]. В настоящей работе регистрировалось полное излучение потока в видимом диапазоне, собираемое по двум хордам, пересекающим поток плазмы на расстоянии 50 мм друг от друга вдоль распространения потока. Собираемое излучение с помощью ФЭУ преобразуется в электрические сигналы,

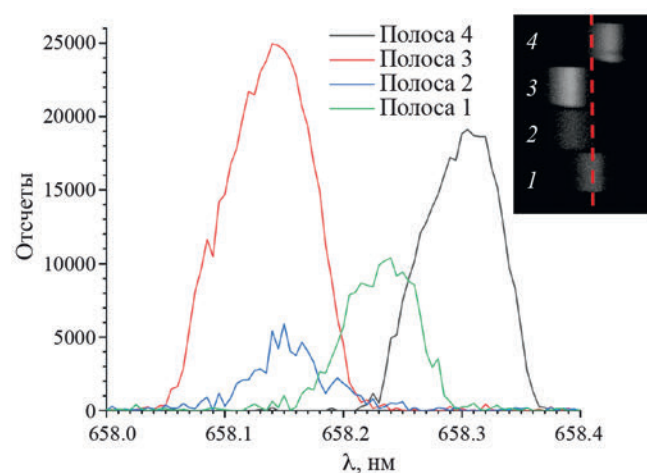


Рис. 5. Пример свечения и спектра примеси С II для четырех направлений наблюдения: 1 — перпендикулярно потоку, 2 — навстречу потоку, 3 — навстречу потоку, 4 — вслед потоку.

регистрируемые осциллографом. На каждом сигнале отчетливо прослеживаются характерные пики, соответствующие движению сгустков в потоке [10]. Скорость потока плазмы вычисляется по задержке между сигналами на двух осциллограммах (времени пролета плазмы между двумя сечениями). Иллюстрация определения задержки приведена на рис. 6.

Сопоставление кривых скорости движения плазменного потока, полученных двумя разными способами, показывает близкий результат (рис. 7). Видно непостоянство скорости на протяжении разряда, объясняющееся непостоянством вкладываемой мощности в разряд и величиной мгновенного расхода газа. Можно отметить тенденцию к завышению скорости, определяемой времяпролетным методом, что объясняется отслеживанием именно областей повышенной яркости — они соответствуют локальным увеличениям мощности разряда и скорости потока. Также можно отметить, что этот метод перестает давать результаты в окончании разряда, поскольку со спадом мощности излучение потока теряет упорядоченность, и отслеживание движения отдельных сгустков становится невозможным. К преимуществам времяпролетного метода можно отнести техническую простоту реализации.

Использование собранного диагностического комплекса позволило зарегистрировать поведение скорости плазменного потока КСПУ на протяжении разряда для водорода, дейтерия и гелия при варьировании вкладываемой в разряд энергии. Сводные зависимости скорости потока и тока разряда от времени приведены на рис. 8. Указанные на графиках напряжения для пусков соответствуют запасенной в конденсаторной батарее энергии: 1.5 кВ — 110 кДж (для дейтерия 1.6 кВ — 120 кДж), 2 кВ — 190 кДж, 3 кВ — 430 кДж. Для КСПУ, в котором ускорение плазмы осуществляется силой Ампера, определяющую роль играет ток разряда. Хорошо видно, что при одинаковой энергии в батарее, максимальный ток достигается для водорода и снижается при увеличении атомарной массы рабочего газа, также снижается и полная вложенная

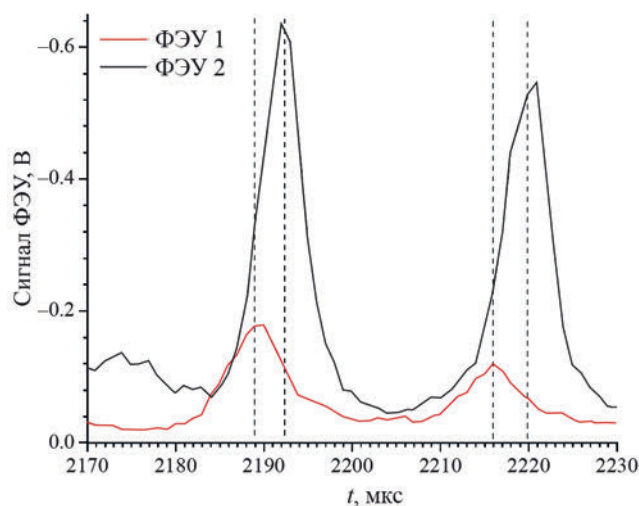


Рис. 6. Иллюстрация определения задержки для вычисления скорости потока временем пролетным методом.

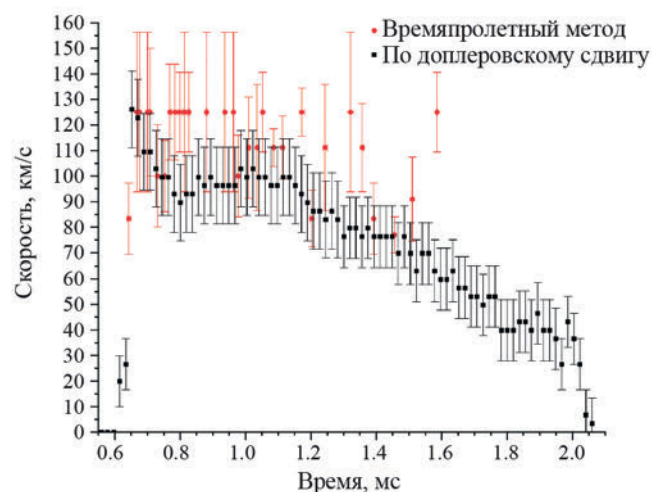


Рис. 7. Сопоставление результатов измерения скорости потока разными методами.

в разряд энергии. В соответствии с поведением тока, максимальные скорости наблюдаются для водорода и также снижаются при увеличении атомарной массы рабочего газа. Это в целом ожидаемый результат, соответствующий базовым представлениям плазмодинамики.

Существенная возможность, которую представляет высокоскоростная спектроскопия доплеровского сдвига — это отслеживание во времени изменений скорости потока. Видно, что скорость потока возрастает в средней части разряда (1–1.5 мс) в моменты роста тока при подключении секций конденсаторных батарей. Фиксируется быстрый спад скорости в завершающей стадии разряда, превышающий динамику снижения тока. Выявлен значительный скачок скорости потока в начальной стадии разряда. Этот эффект хорошо заметен для водорода, слабо проявляется

для дейтерия и наиболее выражен для гелиевой плазмы. Наиболее вероятно, что такое поведение вызвано несогласованностью скоростей нарастания для тока разряда и концентрации газа на входе в ускоритель.

На рис. 9 приведены значения средней скорости потока плазмы для разных рабочих газов в зависимости от вложенной в разряд энергии. Очевидно, что при сохранении общей массы ускоряемого вещества и росте скорости, отображаемая зависимость должна приближаться к корневой. В случае близких энергий разряда в диапазоне 30–100 кДж скорости потока оказываются близкими для различных газов, но в целом тенденция к понижению скорости с ростом атомной массы продолжает прослеживаться.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продемонстрирована техника определения скорости плазменного потока методом спектроскопии доплеровского сдвига. Аппаратная комбинация монохроматора-спектрографа с компенсацией aberrации астигматизма, фокусным расстоянием 522 мм, дифракционной решеткой 2400 штрихов/мм (M522i) и высокоскоростной камеры с размером пиксела 13.5 мкм, максимальной скоростью съемки 300000 кадров в секунду (Phantom 2640) позволяет регистрировать скорость с точностью до 5 км/с при определении сдвига линии по максимуму и с точностью до 1 км/с при определении сдвига линии по анализу профиля для узких линий с полушириной до 0.1 нм. При использовании достаточно интенсивных линий возможна работа с минимальной экспозицией 1 мкс и максимальной скоростью съемки.

Экспериментально показано, что для плазменного потока КСПУ возможно исследовать особенности поведения скорости на протяжении разряда длительностью ~ 1 мс и их взаимосвязь с крупномасштабными (от 10 мкс) изменениями тока. Описанная диагностика может служить действенным инструментом в работах по оптимизации формы токового импульса и его синхронизации с напуском газа в целях разработки прототипа электроракетного двигателя. Показано, что времяпролетная методика дает близкий результат и также может применяться в разработке ЭРД.

Приведены результаты экспериментального исследования скорости потока для водорода, дейтерия и гелия в зависимости от вложенной в разряд энергии. Максимальное значение скорости 145 км/с достигнуто при работе на водороде, скорость, близкая к 100 км/с достигается и для дейтерия. Это обусловлено, в первую очередь, более высоким вкладом энергии из конденсаторной батареи в разряд при работе на водороде. Скорости потока оказываются близкими для различных газов в случае сравнимых энергий разряда, но отмечается тенденция к понижению скорости с ростом атомной массы.

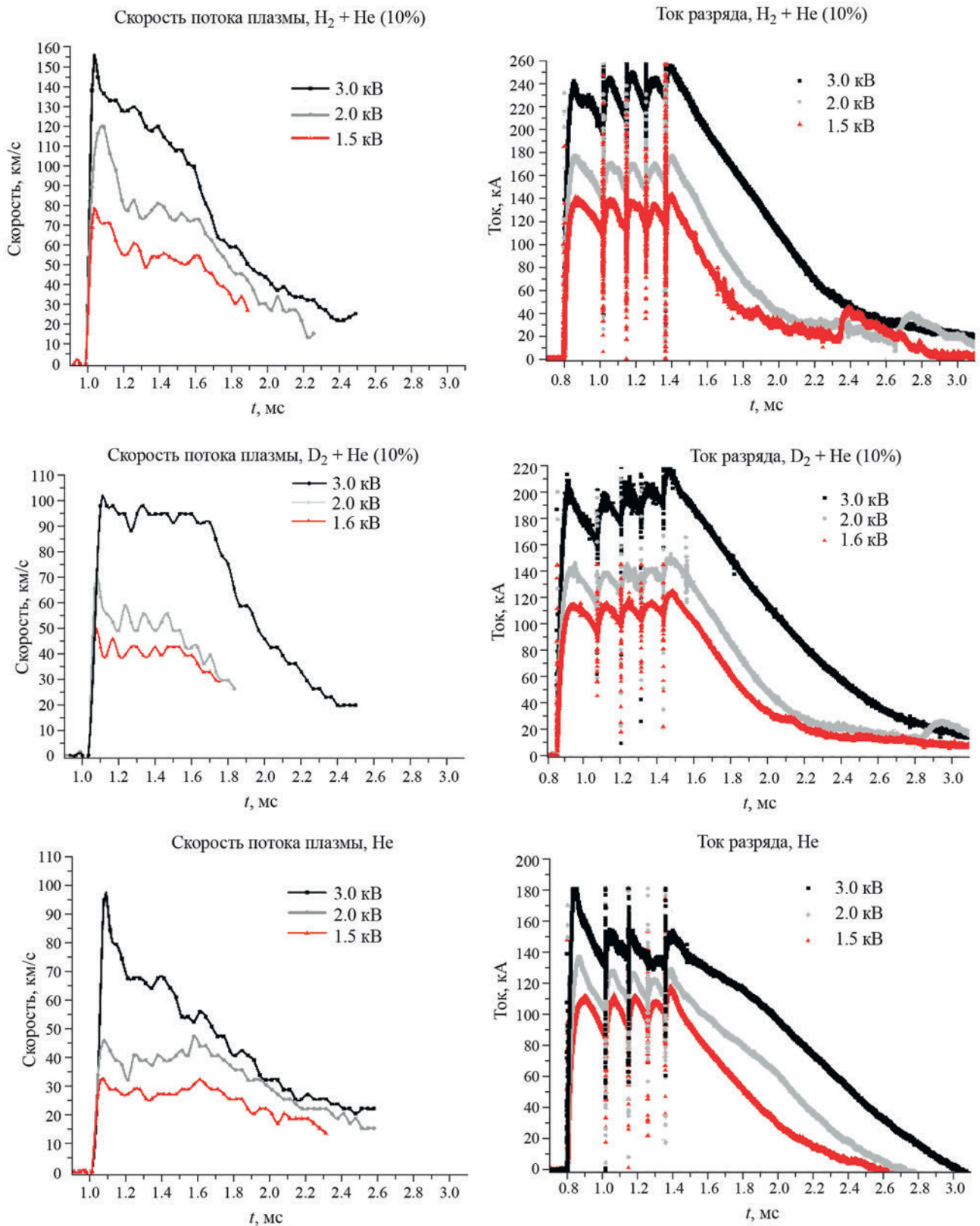


Рис. 8. Скорости потока и разрядные токи для водорода, дейтерия и гелия при варьировании вкладываемой в разряд энергии.

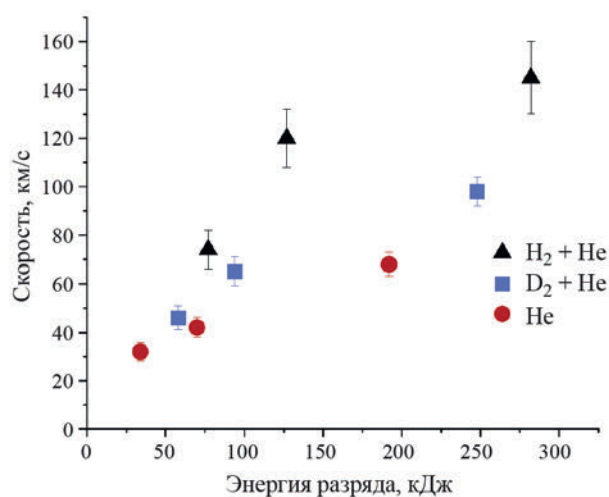


Рис. 9. Скорость потока плазмы в зависимости от вложенной в разряд энергии для разных плазмообразующих газов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность А.Ю. Малютину за создание программы автоматической обработки данных спектроскопии доплеровского сдвига.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственных контрактов № Н.4ц.241.09.21.1115 от 29.04.2021, № Н.4ф.241.09.22.1127 от 25.08.2022 и № Н.4к.241.09.23.1062 от 19.04.2023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климов Н.С., Коваленко Д.В., Подковыров В.Л., Кочнев Д.М., Ярошевская А.Д., Урлова Р.В., Козлов А.Н., Коновалов В.С. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. С. 52. Doi: 10.21517/0202-3822-2019-42-3-52-63.
2. Голобородько В.Т., Киселев Ю.М. // Теплофиз. высоких температур. 1971. Т. 9. С. 1248.
3. Дейчули П.П., Бруль А.В., Давыденко В.И., Иванов А.А., Осин Д., Магги Р. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 596. Doi: 10.31857/S0367292121070064.
4. Инжеваткина А.А., Бурдаков А.В., Иванов И.А., Ломов К.А., Поступаев В.В., Судников А.В., Устюжанин В.О. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 706. Doi: 10.31857/S0367292121080059.
5. Кирий Н.П., Харлачев Д.Е., Шпаков К.В. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 1092. Doi: 10.31857/S0367292123601194.
6. Lebedev V.B., Feldman G.G., Savel'ev A.B., Bugar I., Chorvat Jr. D. // Proc. SPIE. 26th Internat. Congress on High-Speed Photography and Photonics (17 March 2005). P. 5580. Doi: 10.1117/12.597451.
7. Yates K.C., Langendorf S.J., Hsu S.C., Dunn J.P., Brockington S., Case A., Cruz E., Witherspoon F.D., Thio Y.C.F., Cassibry J.T., Schillo K., Gilmore M. // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. P. 062706. Doi: 10/1063/1/5126855.
8. Воронин А.В., Гусев В.К., Герасименко Я.А., Судьенков Ю.В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. С. 36.
9. Коваленко Д.В., Климов Н.С., Житлухин А.М., Музыченко А.Д., Подковыров В.Л., Сафронов В.М., Ярошевская А.Д. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2014. Т. 37. С. 39. Doi: 10.21517/0202-3822-2014-37-4-39-48.
10. Kartasheva A.A., Gutorov K.M., Podkovyrov V.L., Muravyeva E.A., Lukyanov K.S., Klimov N.S. // Phys. Plasmas. 2024. V. 31. 043107. DOI: 10.1063/5.0198341
11. Малютин А.Ю., Ярошевская А.Д., Подковыров В.Л., Гуторов К.М. // Тез. доклад. XLIX Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС, 14–18 марта 2022 г. С. 163. Doi: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.125.

DETERMINATION OF PLASMA FLOW VELOCITY WITH TIME RESOLUTION BASED ON THE DOPPLER EFFECT

A. D. Yaroshevskaya^{a,*}, K. M. Gutorov^a, V. L. Podkovyrov^a, and Yu. I. Litvinenko^a

^a*State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research,
Troitsk, Moscow, 108840 Russia*

**e-mail: YaroschAD@triniti.ru*

The equipment and method for measuring the plasma flow velocity of a quasi-stationary high-current plasma accelerator (QSPA) based on high-speed Doppler shift spectroscopy are described. Time sampling of measurements can reach 100 kHz, which makes it possible to study in detail processes lasting about 1 ms or more. The correspondence between the flow velocity values obtained by Doppler shift spectroscopy and the time-of-flight method has been demonstrated. The results of measurements are presented, showing that the velocities of the QSPA plasma flow lie in the range of 30–160 km/s, depending on the energy input into the discharge and the composition of the working gas.

Keywords: plasma velocity, Doppler effect, QSPA, ERT