

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ ВИНТОВОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

© 2021 г. А. А. Инжеваткина^а*, А. В. Бурдаков^а, И. А. Иванов^а, К. А. Ломов^б,
В. В. Поступаев^а, А. В. Судников^а, В. О. Устюжанин^б

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*e-mail: anna.inzhevatkina@gmail.com

Поступила в редакцию 24.02.2021 г.

После доработки 31.03.2021 г.

Принята к публикации 06.04.2021 г.

На открытой ловушке СМОЛА в ИЯФ СО РАН ведутся исследования физики подавления продольных потерь плазмы из системы, в которой вращающаяся плазма удерживается в магнитном поле с геликоидальной симметрией. В такой концепции одним из основополагающих моментов является возможность управления скоростью вращения плазмы. Приведено описание применявшихся спектроскопической и магнитной диагностик, которые позволили регистрировать параметры вращения плазмы в экспериментах. Измеренная угловая скорость вращения плазмы составляла $(0.5-1) \times 10^6 \text{ с}^{-1}$ в различных режимах работы установки. Обсуждаются зависимости скорости углового вращения от различных параметров эксперимента.

Ключевые слова: магнитное удержание, открытая ловушка, винтовое удержание, доплеровская спектроскопия, вращения плазмы, магнитные зонды

DOI: 10.31857/S0367292121080059

1. ВВЕДЕНИЕ

Достижения физики открытых ловушек последнего времени и, в частности, результаты работ на установках ГОЛ-3 [1] и ГДЛ [2, 3] позволяют ставить более амбициозные цели по созданию открытых ловушек реакторного класса [4]. Найдены способы решения проблем, связанных с продольной электронной теплопроводностью и кинетическими неустойчивостями плазмы [5, 6]. Современная концепция подобных ловушек [1, 7] предполагает модульную структуру, в которой различные модули будут приносить в систему дополнительные преимущества различных предлагаемых идей и технологий, известных в физике открытых ловушек.

Одними из таких функциональных модулей, рассматриваемых в настоящее время, являются секции с многопробочным магнитным полем, которые должны уменьшать продольные потери частиц и энергии из центральной ловушки газодинамического типа. Привлекательным представляется динамическое многопробочное удержание, т.е. использование концевых многопробочных секций с магнитными пробками, движущимися навстречу плазменному потоку со скоростью, сравнимой с тепловой скоростью ионов. Такая идея обсуждалась [8, 9], однако она

имеет очевидные технические трудности при рассмотрении систем с предельно достижимым в сверхпроводящих катушках магнитным полем и плазмой реакторного класса. В работе [10] было предложено обеспечивать условие динамического многопробочного удержания за счет придания плазме вращения вокруг магнитной оси в стационарном магнитном поле с винтовой симметрией. Физически аналог такой системы – винт Архимеда, а важное свойство предложенной схемы является то обстоятельство, что при правильном выборе параметров эксперимента неоклассические эффекты будут приводить к дрейфу частиц на ось, т.е. к пинчеванию плазмы [11].

Экспериментальное исследование винтового удержания ведется в ИЯФ СО РАН на установке СМОЛА (рис. 1, 2). Установка включает в себя источник плазмы, входной расширитель, транспортную секцию с 12 периодами винтового магнитного поля и выходной расширитель. Плазма в источнике формируется за счет ионизации нейтрального газа электронами, эмитированными из накаливаемого LaV_6 катода. Подробное описание источника приведено в [12]. Во входном расширителе установки между источником плазмы и транспортной секцией сформирована область с пониженным магнитным полем. Прямая и вин-

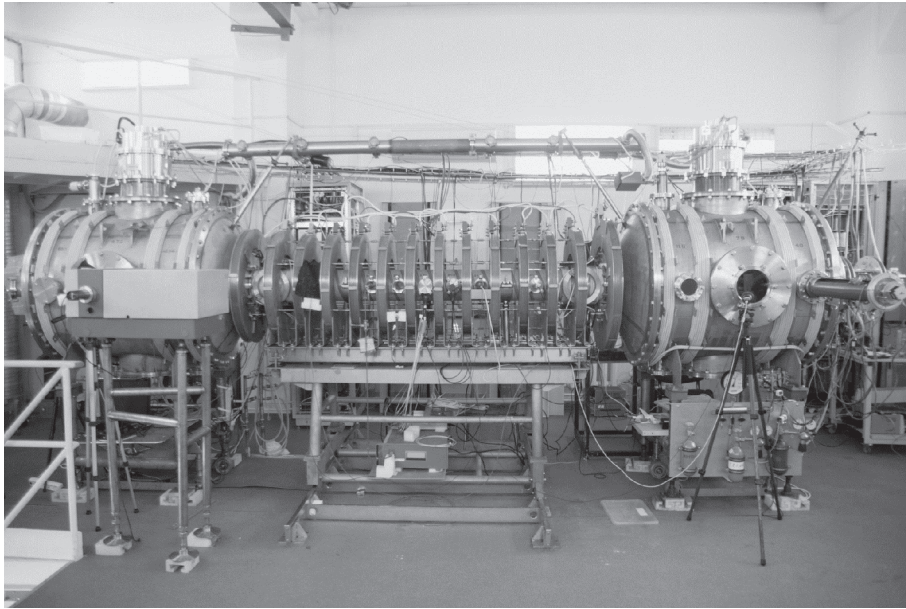


Рис. 1. Фотография установки СМОЛА.

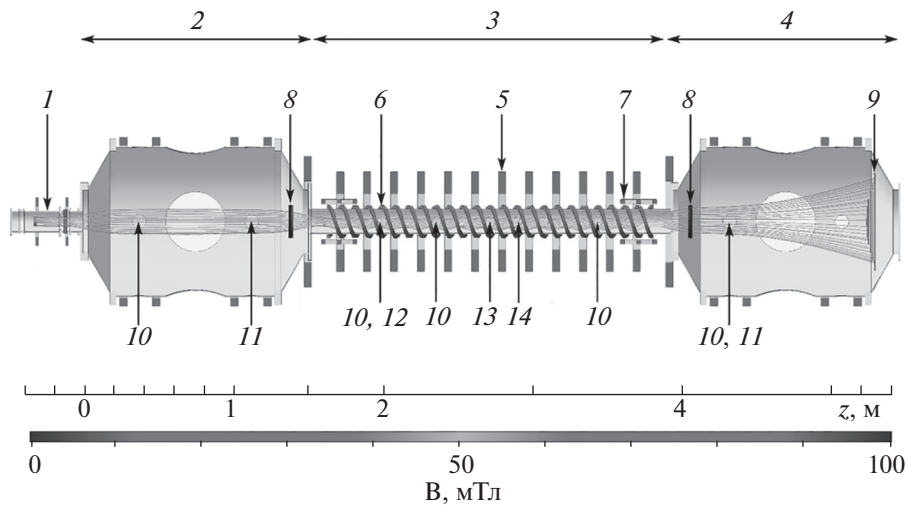


Рис. 2. Схема установки СМОЛА с используемыми диагностиками: 1 – источник плазмы, 2 – входной расширитель, 3 – транспортная секция, 4 – выходной расширитель, 5 – прямой соленоид, 6 – винтовая обмотка, 7 – катушки коррекции, 8 – лимитер, 9 – приемник плазмы, 10 – двойной зонд, 11 – доплеровский спектрометр, 12 – УФ-фотодиод, 13 – магнитный зонд, 14 – зонд Маха.

товыми компонентами магнитного поля в транспортной секции создаются независимо. В выходном расширителе установлен приемник плазмы, состоящий из пяти концентрических пластин; потенциал на пластины плазмореципиента подается независимо. Разность потенциалов между центральной и периферийной пластинами плазмореципиента составляет 200–300 В. Установленные лимитеры на входе и выходе винтовой секции обеспечивают ограничение плазменной струи от

стенки камеры. Входной лимитер находится под потенциалом около 0 В, выходной – под потенциалом от –100 до –50 В. Далее в тексте в качестве начала отсчета продольной координаты z принимается выходная апертура источника плазмы.

Основные параметры представлены в табл. 1, подробное описание установки представлено в работах [13, 14].

Плазма вращается в скрещенных радиальном электрическом и винтовом магнитных полях.

Таблица 1. Основные параметры установки СМОЛА: n_i – плотность плазмы, T_e – электронная температура, r – радиус плазмы, t – длительность разряда, B_z – магнитное поле, E_r – радиальное электрическое поле

$n_i, 10^{19} \text{ м}^{-3}$	0.1–1
$T_e, \text{ эВ}$	5–30
$r, \text{ см}$	5–10
$t, \text{ с}$	0.15–1.5
$B_z, \text{ мТл}$	30–150
$E_r, \text{ В/см}$	10–35

Вращение плазмы создается радиальным электрическим полем плазменной пушки и потенциалом секционированного торцевого плазмодриемника. Электрическое поле пушки соответствует отрицательному заряду на оси плазмы. Во вращающейся системе отсчета плазмы продольная скорость магнитных пробок равна

$$V_z \approx c \frac{hE_r}{2\pi r B_z} \sim 10^7 \text{ см/с},$$

где $h = 18 \text{ см}$ – шаг винта, $r = 5\text{--}10 \text{ см}$ – радиус плазмы, $E_r(r)$ – радиальное электрическое поле, B_z – магнитное поле.

Для модели твердотельного вращения отношение E_r/r постоянно. Магнитные пробки движутся в системе отсчета плазмы противоположно потоку плазмы. В этом случае ожидается два значительных эффекта: подавление потока на периферии плазмы с более высоким пробочным отношением вдоль линии поля и радиальное пинчевание плазмы.

Конфигурация магнитного поля, используемая в данной серии экспериментов, представлена на рис. 3 при ведущем магнитном поле в транспортной секции 100 мТл. Здесь и далее магнитная конфигурация будет характеризоваться величиной магнитного поля в транспортной секции. При увеличении магнитного поля конфигурация остается прежней, поля поднимаются синхронно

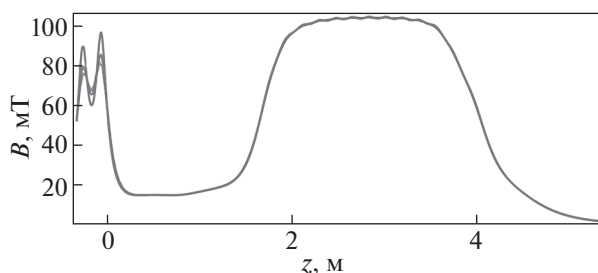


Рис. 3. Конфигурация магнитного поля в описанных экспериментах при ведущем магнитном поле в транспортной секции 100 мТл.

по всей длине установки: в источнике плазмы, расширителях и транспортной секции (рис. 1).

В работе [15] показано, что при винтовой гофрировке продольный поток вращающейся плазмы снижается. Повышение скорости вращения приводит к более выраженному подавлению продольного потока частиц, что было продемонстрировано в работе [16]. По этой причине поиск параметров плазмы, отвечающих повышению скорости вращения, является важным для исследования винтового удержания. Ранее в нестационарном режиме работы источника плазмы угловая скорость вращения была $\omega = (6\text{--}8) \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ [17]. Переход к стационарному режиму работы источника плазмы привел к понижению угловой скорости вращения до $\omega = (3\text{--}5) \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ [16]. Повышение газовой эффективности источника плазмы, описанного в [12], позволило увеличить электростатический потенциал, вносимый в плазму, что привело к росту угловой скорости $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ вращения плазмы. Газовая эффективность рассчитывается из соотношения полного расхода газа плазменной пушкой и потока неионизованного газа в установку и находится на уровне 95–97%.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию зависимостей скорости данного вращения от параметров разряда при увеличенной газовой эффективности источника. В разделе 2 приведено описание диагностических систем, использованных для определения скорости вращения. Раздел 3 посвящен калибровке спектральной системы для измерения пространственного распределения скорости плазмы. Основные экспериментальные результаты приведены в разделе 4. В разделе 5 приведено обсуждение результатов и заключение.

2. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Известно, что использование прецизионной спектроскопии позволяет определить наличие примесей в плазме, скорость движения (доплеровский сдвиг), ионную температуру (доплеровское уширение), концентрацию и температуру электронов (интенсивность излучения), а также магнитные (эффект Зеемана) и электрические (эффект Штарка) поля. Для параметров плазмы в установке СМОЛА доплеровский сдвиг спектральной линии излучения H_α оценивается как $\Delta\lambda \approx 0.1 \text{ нм}$; доплеровское уширение как $\Delta\lambda \approx 0.02 \text{ нм}$, уширение за счет эффектов Зеемана и Штарка составляет $\Delta\lambda \sim 10^{-5} \text{ нм}$ и $\Delta\lambda \sim 10^{-4} \text{ нм}$ соответственно.

Регистрируемая линия излучения H_α отвечает переходу нейтрального атома водорода из состояния $3p$ в состояние $2s$. Время жизни возбужденно-

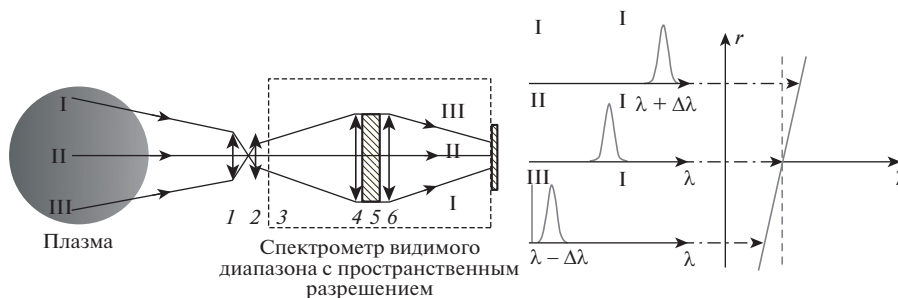


Рис. 4. Схема измерения скорости вращения по доплеровскому сдвигу: 1 – объектив, 2 – длиннофокусная толстая линза ($f = 150$ мм); монохроматор: 3 – входная щель, 4, 6 – параболические зеркала, 5 – дифракционная решетка. 7 – высокоскоростная ПЗС-камера.

го состояния $3p$ атома водорода составляет $\tau \approx 5 \times 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ [18]. В плазменной струе существует две фракции атомов: франк–кондоновские атомы с энергией 1–2 эВ, образованные в результате диссоциации молекул водорода, и возбужденные нейтральные атомы, возникшие в процессе рекомбинации, с энергией около 5 эВ. В результате, при достаточно большой линейной скорости на периферии плазмы, должны наблюдаться как смещенная вследствие вращения плазмы линия излучения возбужденного нейтрального водорода, так и несмещенная линия излучения франк–кондоновских атомов. Среднее расстояние, пройденное атомом до излучения фотона, составляет $L \approx 5 \times 10^{-3}$ см, что пренебрежимо мало по сравнению с радиусом плазмы $r \sim 5$ см. Таким образом, локальная средняя скорость возбужденных нейтральных атомов соответствует локальной средней скорости ионов плазмы в данной точке.

Измерение скорости плазмы путем определения доплеровского сдвига спектральной линии излучения H_{α} осуществляется с помощью пространственно разрешающих спектрометров на базе монохроматоров МДР-12 и МДР-23, построенных по схеме, аналогичной [19]. Принципиальная схема спектральных приборов приведена на

рис. 4, основные характеристики представлены в табл. 2.

Точка в плоскости ПЗС-матрицы на цифровой камере проецируется в плазме в плоскость, параллельную магнитному полю [19]. Характерный размер изменения параметров плазмы сопоставим, по меньшей мере, с длиной одной ячейки многопробочного поля; тем самым, параметры плазмы в указанной области можно считать неизменными. Изображение плазмы в свечении спектральной линии фокусируется перед входной щелью спектрального прибора, затем разлагается в спектр дифракционной решеткой и регистрируется ПЗС-камерой как двумерное изображение: по одной координате – длина волны λ , по другой – радиус хорды наблюдения x . Далее в статье учитываем, что при твердотельном вращении координата радиуса хорды наблюдения x совпадает с радиусом плазмы r .

Использовалась входная щель спектрометра в виде серпа для улучшения разрешающей способности спектрометра путем уменьшения дисторсии и подавления, насколько это возможно, астигматизма прибора.

Спектр регистрировался ПЗС-камерами SDU-285 с высокочувствительной матрицей SONY ICX285AL со следующими параметрами: размер

Таблица 2. Основные параметры спектрометров

Параметры	МДР-12	МДР-23
Расстояние до центра плазмы, см	70	100
Фокусное расстояние объектива, мм	25	35
Обратная линейная дисперсия, нм/мм	2.4	1.2
Пространственное разрешение, мм	1.4	1.6
Масштаб изображения, пх/см	88	94
Фокусное расстояние линзы, мм	50	50
Входная щель	Серповидная	Прямая
FWHM, нм	0.072	0.043

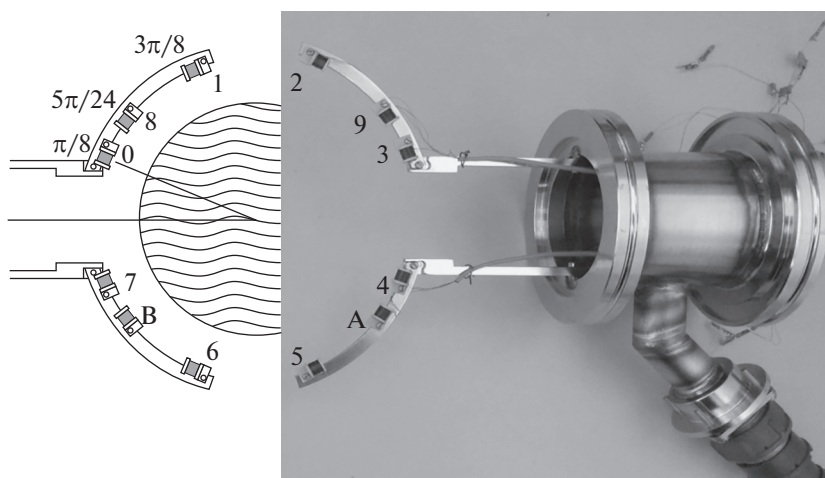


Рис. 5. Схема и фотография многоканальной диагностики азимутальных магнитных возмущений: 0–9, А, В – магнитные зонды.

пикселя (мкм) 6.45×6.45 , формат кадра 1392×1032 , размер матрицы 8.77×6.6 мм. Максимальная частота съемки в эксперименте составляет 1 кадр/20 мс.

Пространственное распределение доплеровского сдвига линии H_{α} находится как отклонение спектральной линии, полученной в эксперименте, от калибровочной линии. Описание калибровки системы приведено в разд. 3.

Наряду с оптической диагностической системой, для определения скорости вращения плазмы применялась диагностика локальных возмущений азимутального магнитного поля. В центральной секции установки $z = 2.76$ м расположена многоканальная магнитная диагностика, состоящая из 12 абсолютно калиброванных азимутальных зондов (катушки длиной 5 мм и диаметром 5 мм, эффективная площадь $S_{\text{эф}} \approx 25 \text{ см}^2$), распределенных по азимутальной координате вокруг плазменного шнура и отстоящих на $r = 7$ см от оси установки (рис. 5). Регистрация сигналов осуществлялась АЦП ADC1250 (частота дискретизации до 50 МГц, разрядность 12 бит) [20], внутреннее сопротивление которого согласовано с волновым сопротивлением кабеля. Собственная резонансная частота измерительного канала составляет более 10 МГц. Параметры измерительного тракта позволяют детектировать на частоте порядка 100 кГц возмущения магнитного поля от 0.1 мкТл. Интегрирование сигнала для нахождения магнитного поля выполняется при его последующей цифровой обработке методом трапеций. Характерный вид сигнала показан на рис. 6.

По данным многоканальной магнитной диагностики восстанавливается форма сечения продольного тока в плазменном шнуре в предположении малости возмущений относительно акси-

ально симметричного распределения плотности тока (рис. 7). Возмущение формы сечения тока представляется в виде разложения в ряд Фурье по азимутальному углу. Азимутальные моды возмущения определяются как соответствующие члены пространственного Фурье-разложения, где нулевой моде отвечают флуктуации полного продольного тока, первой моде – смещение центра тока, более высоким – нарушение азимутальной симметрии плотности тока с различными волновыми числами.

В частности, первая мода разложения может быть ассоциирована со смещением тока от центральной оси установки. Вращению токовых возмущений с постоянной угловой скоростью отвечает линейный рост фазы возмущения со временем. Вращение плазмы приводит к вращению в замороженных возмущений плотности тока, но не является единственной возможной причиной изменения фазы магнитных возмущений. Тем самым, скорость вращения плазмы не может быть

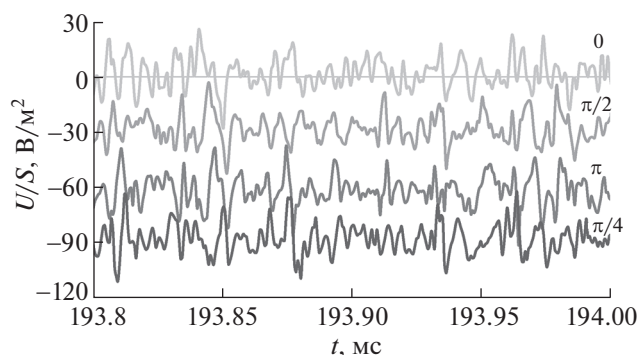


Рис. 6. Пример сигналов многоканальной диагностики азимутальных магнитных возмущений.

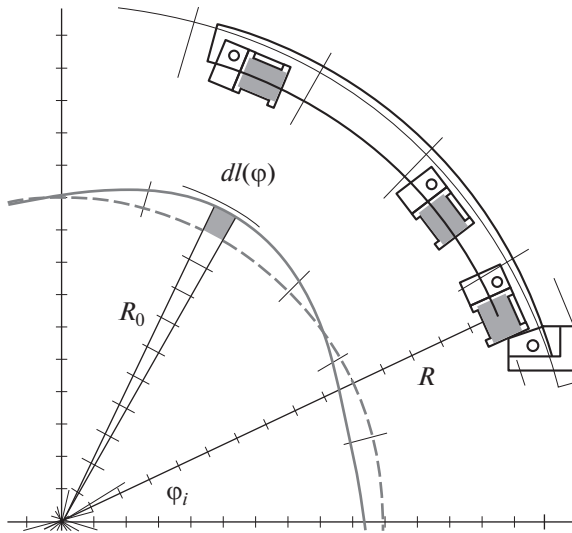


Рис. 7. Возмущение формы граничной поверхности сечения тока.

однозначным образом выделена из фазовой скорости вращения магнитных возмущений без использования других диагностик. Сравнение результатов синхронных измерений линейной скорости движения плазмы и скорости вращения магнитных возмущений в различных областях установки позволяет сделать вывод о наличии либо отсутствии продольной неоднородности угловой скорости вращения плазмы.

Для вычисления скорости вращения первой моды использовались восемь зондов, равномерно распределенных по азимутальной координате. Сигналы проинтегрированы и пропущены через цифровой фильтр Баттерворта с полосой пропускания 0.5–780 кГц, после чего выполнен расчет амплитуд и фаз азимутальных мод возмущения до третьей включительно. Для минимизации вычислительных ошибок использовались 8 зондов, измеряемых одним модулем АЦП.

3. КАЛИБРОВКА СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРА

Калибровка спектрометров с пространственным разрешением проводилась по линиям излучения D_α (656.106 нм) и H_α (656.278 нм) эталонной дейтериевой лампы ДДС-30 (рис. 8).

Полученные спектры позволили определить линейную дисперсию и ширину аппаратной функции спектрометра по всей ширине видимой области пространства, а также положение и форму несмещенной спектральной линии H_α .

Пространственное разрешение было найдено по изображению спектра ртутной лампы, закрытой маской с резкой границей. Ширина функции



Рис. 8. Калибровочный спектр эталонной дейтериевой лампы ДДС-30, полученный спектрометром с пространственным разрешением.

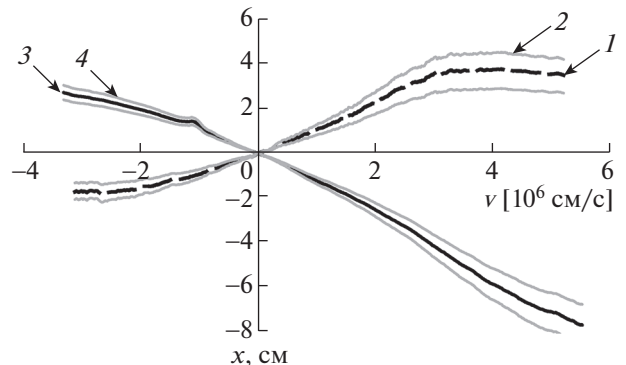


Рис. 9. Распределения проекций скорости плазмы на хорду наблюдения: 1 – в выходном и 3 – во входном расширителях, 2, 4 – доверительный интервал.

рассеяния точки составила 1.4 и 1.6 мм для спектрометров на базе МДР-12 и МДР-23 соответственно, что существенно меньше характерных размеров изменения параметров плазмы. В табл. 2 указаны основные параметры спектрометров, работающих на установке СМОЛА.

Для проверки правильности работы диагностической системы два спектрометра были установлены в координатах $z = 1.15$ и 4.34 м с противоположных сторон относительно плазменного шнура (рис. 1, 2). Оба спектрометра одновременно регистрировали вращение плазмы, при этом доплеровский сдвиг спектральной линии в каждой точке поля зрения имел противоположный знак для каждого из спектрометров. При достаточно высокой повторяемости экспериментальных условий и полученных скоростей погрешность определяется аппаратной ошибкой. На рис. 9 показаны распределения проекций скорости плазмы на хорду наблюдения, полученные двумя приборами, расположенными на разных координатах. Данный факт подтверждает корректность измерения пространственного распределения доплеровского сдвига и процедур восстановления распределения скорости на его основе.

Экспериментальная зависимость линейной скорости от пространственной координаты аппроксимируется прямой с точностью 5–10%, тем

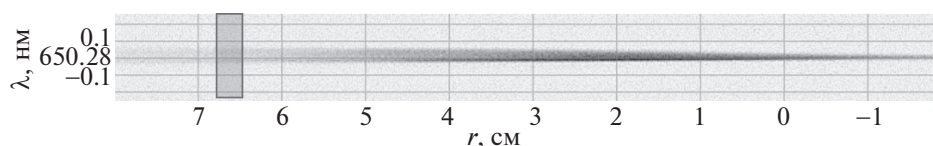


Рис. 10. Изображение смещенной и несмещенной спектральных линий излучения H_{α} .

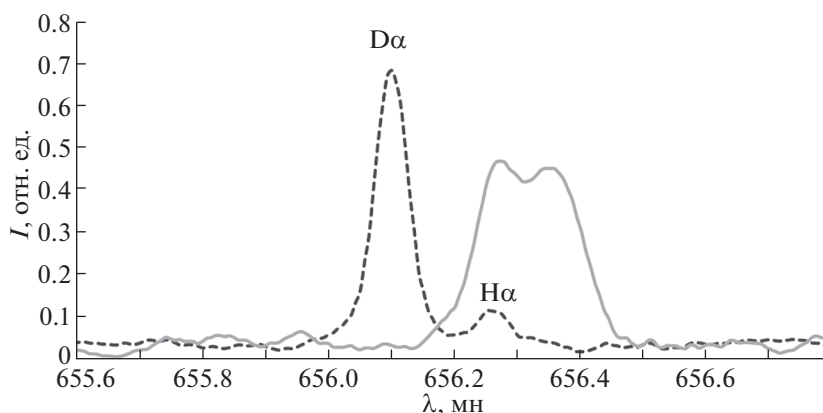


Рис. 11. Штриховая линия — калибровочный спектр излучения дейтериевой лампы, сплошная линия — спектр излучения линии H_{α} , полученный в эксперименте и усредненный по радиусам хорд наблюдения в диапазоне от 6.5 до 7 см.

самым вращение может быть представлено как твердотельное. Отметим, что спектр регистрируется вдоль хорд наблюдения, что затрудняет интерпретацию результатов в зависимости от радиуса плазмы. Но в случае наблюдаемого твердотельного вращения, хордовое распределение излучения сопоставимо с радиальным. В выходном расширителе на периферии плазмы линейная скорость выходит на плато, поэтому в качестве результатов будет приведена максимальная угловая скорость вращения.

Спектральное разрешение спектрометра на основе МДР-23 позволило наблюдать на краю плазменного шнура в области с линейной скоростью $V_{\phi} \approx 4 \times 10^6$ см/с как несмещенную, так и смещенную линии излучения H_{α} , интенсивности которых примерно одинаковы (рис. 10).

На рис. 11 представлены спектры излучения дейтериевой лампы и плазмы в установке СМОЛА, проинтегрированные по координате внутри области, выделенной на рис. 10. Наложение двух спектров демонстрирует, что один из пиков экспериментальной линии действительно отвечает несмещенной калибровочной линии H_{α} .

Отличие смещенной и несмещенной линий излучения превышает ширину аппаратной функции. В спектре свечения плазмы видна характерная особенность этой линии: на данном радиусе наблюдения явно разделяются свечение нейтрального газа на несмещенной длине волны и

смещенное свечение возбужденных атомов, возникших из ионов вращающейся плазмы. Величина доплеровского уширения линии одинакова в пределах аппаратной погрешности на всех радиусах хорды и соответствует температуре ионов $T_i \approx 4$ эВ.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В описываемых экспериментах по данным спектральной диагностики скорость вращения составляет $\omega = (0.9-1.1) \times 10^6$ с⁻¹ и $\omega = (0.6-0.8) \times 10^6$ с⁻¹ во входном и выходном расширителях соответственно (рис. 12). Угловая скорость вращения остается постоянной в течение всей стационарной фазы разряда. Скорость вращения первой моды магнитных возмущений в транспортной секции близка к скорости вращения плазмы в выходном расширителе, что делает возможным также ассоциировать их с вращением плазмы.

Постоянство скорости вращения позволяет повышать соотношение сигнал/шум и точность обработки изображений спектральных линий, увеличивая выдержку при измерении спектров либо усредняя значение скорости вращения плазмы по нескольким снимкам, полученным за один разряд.

В экспериментах [14, 15] были выявлены основные регулируемые параметры системы, управление которыми может обеспечить измене-

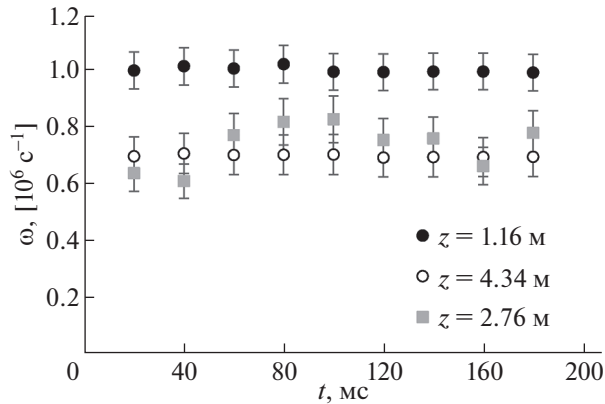


Рис. 12. Зависимость угловой скорости вращения плазмы от времени.

ние скорости вращения. Предположительно, такими параметрами являются плотность плазмы, вносимый в плазму потенциал, конфигурация и величина магнитного поля. Модернизация источника плазмы [12] позволила повысить эти параметры, что обеспечило возможность увеличения угловой скорости вращения. Основной задачей экспериментов было управление скоростью вращения и достижение максимальных значений линейной скорости на периферии плазмы.

Внешнее управление подаваемыми на плазму потенциалами на установке СМОЛА может осуществляться не только подачей потенциалов на секции плазмоприемника, но и напряжением между анодом и катодом плазменной пушки. Данная величина варьировалась в диапазоне от 200 до 300 В (рис. 13). Изменение напряжения приводит также к изменению тока плазмы в диапазоне от 125 до 235 А и пропорциональному увеличению плотности плазмы [12]. Во входном расширителе угловая скорость вращения остается постоянной, в то время как на выходе установки скорость падает при уменьшении поданного на-

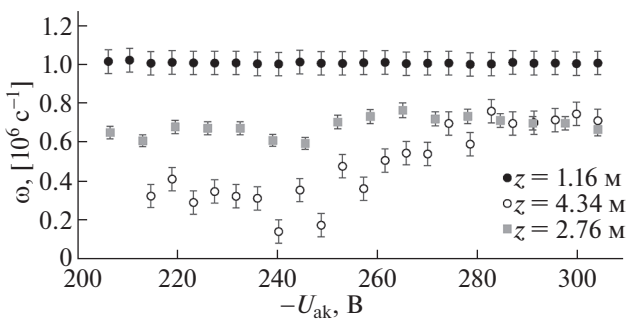


Рис. 13. Зависимость угловой скорости вращения плазмы от напряжения, поданного между катодом и анодом источника плазмы.

пряжения. Угловая скорость вращения в транспортной секции находится между скоростями на входе и на выходе установки, посчитанным по спектроскопии. Это является признаком того, что фазовая скорость магнитных возмущений определяется в основном вращением плазмы, а остальные добавки дают небольшой вклад в фазовую скорость первой моды магнитных возмущений.

Наиболее выраженные изменения угловой скорости вращения были получены при варьировании плотности плазмы. Плотность регулировалась изменением потока нейтрального водорода, подаваемого в разрядную область источника плазмы (рис. 14), который составлял $F = (6-42) \times 10^{19}$ атом/с [12]. Нижняя граница данного диапазона соответствует плотности плазмы $n \approx 0.8 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$, верхняя граница – плотности $n \approx 4 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ в координате $z = 0.4 \text{ м}$.

Экспериментально получены разные зависимости скорости вращения плазмы от напускаемого газа в плазменную пушку во входном и выходном расширителях. Угловая скорость вращения на входе медленно увеличивается в диапазоне $\omega = (0.8-1) \times 10^6 \text{ с}^{-1}$, в то время как на выходе мы можем наблюдать более быстрый рост от $\omega = 0$ до $\omega = 0.8 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$, после чего угловая скорость выходит на плато. При $F \approx 27 \times 10^{19}$ атом/с достигается предел по скорости вращения как во входном, так и в выходном расширителях, поэтому данная величина потока была принята в качестве нижней границы оптимального диапазона по вращению плазмы. Скорость вращения магнитных возмущений в транспортной секции установки изменяется слабо и является промежуточной между скоростями вращения, определенными с помощью спектроскопии. Этот факт – косвенный признак существования вращения плазмы на всей длине установки и малого вклада процес-

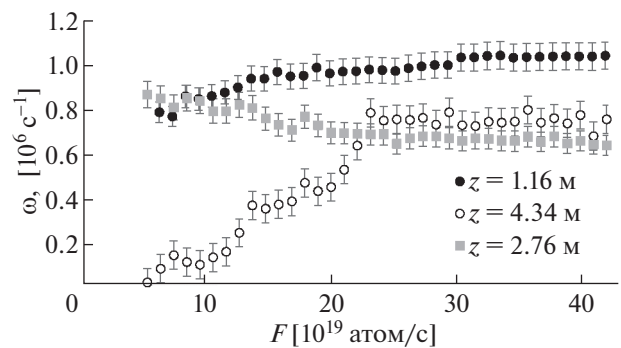


Рис. 14. Зависимость угловой скорости вращения плазмы от потока напускаемого газа в разрядный промежуток источника плазмы.

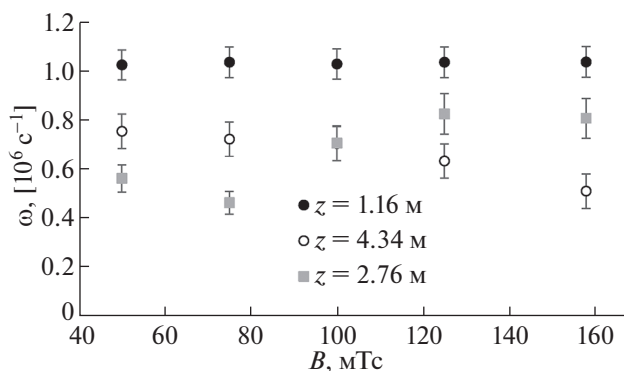


Рис. 15. Зависимость угловой скорости вращения плазмы от величины ведущего магнитного поля.

сов, не связанных с вращением, в фазовую скорость магнитных возмущений.

Была проведена серия экспериментов, направленная на получение зависимости скорости вращения плазмы от амплитуды магнитного поля (рис. 15). Во входном расширителе по-прежнему наблюдаем одинаковую скорость вращения на уровне $\omega \approx 10^6 \text{ c}^{-1}$ вне зависимости от величины ведущего магнитного поля. В выходной части установки регистрируется снижение скорости с $\omega \approx 0.8 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$ до $\omega \approx 0.5 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$ при увеличении магнитного поля от 50 до 155 мТл.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрировано, что измеренная угловая скорость вращения плазмы, зарегистрированная как спектрометрами с высоким пространственным разрешением, так и магнитной диагностикой, находится в диапазоне $(0.5-1) \times 10^6 \text{ c}^{-1}$. Одновременное наблюдение красного и синего смещения на спектрометрах, установленных с противоположных сторон относительно плазменного шнура доказывает как корректность работы такой диагностической системы, так и корректность интерпретации наблюдаемого спектрального смещения. Высокое спектральное разрешение позволяет определить смещение спектральной линии $\Delta\lambda \approx 0.015 \text{ нм}$, что соответствует скорости $V \approx 3 \times 10^5 \text{ см/с}$.

С помощью доплеровской диагностики и диагностики локальных магнитных возмущений измерена скорость вращения плазмы $(0.5-1) \times 10^6 \text{ c}^{-1}$ на разных координатах и при различных режимах работы установки. Указанные величины существенно превосходят скорость вращения $\omega \sim 3 \times 10^5 \text{ c}^{-1}$, наблюдавшуюся в экспериментах до модернизации источника плазмы [17].

Полученные зависимости угловой скорости вращения плазмы от ее параметров демонстрируют то, что в выходном расширителе изменение параметров плазмы имеет большее влияние на скорость вращения, чем вблизи источника плазмы, где угловая скорость остается практически одинаковой. На данном этапе можно сделать вывод, что во входном расширителе мы достигаем угловой скорости вращения $\omega \sim 10^6 \text{ c}^{-1}$, которая является пределом для исследованного диапазона экспериментальных параметров. При данной скорости твердотельного вращения плазмы с радиусом 7 см, максимальная линейная скорость составляет $V \approx 7 \times 10^6 \text{ см/с}$. Электронная температура и плотность плазмы определялись по ВАХ зонда, установленного в координате $z = 0.4 \text{ м}$ [12]. При типичных параметрах плазмы во входном расширителе $T_e \sim 30 \text{ эВ}$, $T_i \sim 4 \text{ эВ}$, $n_i \sim 2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ скорость звука можно оценить как

$$C_s = \sqrt{\frac{\gamma Z T_e}{m_i}} \sim 7 \times 10^6 \frac{\text{см}}{\text{с}}$$

Исходя из оценок, предполагается, что ограничением может служить достижение ионно-звуковой скорости на периферии плазмы, вызывающее развитие неустойчивости, увеличение эффективной поперечной проводимости и соответствующее снижение электрического поля в плазме.

Проведение исследований вращения плазмы проводилось при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-72-10080, эксплуатации установки СМОЛА осуществляется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Burdakov A., Azhannikov A., Astrelin V., Beklemishev A., Burmasov V., Derevyankin G., Ivanenko V., Ivanov I., Ivantsivsky M., Kandaurov I., Konyukhov V., Kotelnikov I., Kovenya V., Kozlinskaya T., Kuklin K., Kuznetsov A., Kuznetsov S., Lotov K., Timofeev I., Makarov A., Mekler K., Nikolaev V., Popov S., Postupaev V., Polosatkin S., Rovenskikh A., Shoshin A., Shvab I., Sinitsky S., Sulyaev Yu., Stepanov V., Trunov Yu., Vyacheslavov L., Zhukov V., Zubairov Ed. // Fusion Sci. Technol. 2007. V. 51. P. 106.
<https://doi.org/10.13182/FST07-A1327>
- Иванов А.А., Приходько В.В. // УФН. 2017. Т. 187. С. 547.
<https://doi.org/10.3367/UFN.2016.09.037967>
- Bagryansky P.A., Anikeev A.V., Denisov G.G., Gospodchikov E.D., Ivanov A.A., Lizunov A.A., Kovalenko Yu.V., Malugin V.I., Maximov V.V., Korobeinikova O.A. // Nuclear Fusion. 2015. V. 55. P. 053009.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/5/053009>
- Bagryansky P.A., Beklemishev A.D., Postupaev V.V. // J. Fusion Energy. 2019. V. 38. P. 162.
<https://doi.org/10.1007/s10894-018-0174-1>

5. Бурдаков А.В., Поступаев В.В. // УФН. 2018. Т. 188. С. 651.
6. Simonen T.C. // J. Fusion Energy. 2016. V. 35. P. 63. <https://doi.org/10.1007/s10894-015-0017-2>
7. Beklemishev A., Anikeev A., Astrelin V., Bagryansky P., Burdakov A., Davydenko V., Gavrilenko D., Ivanov A., Ivanov I., Ivantsivsky M., Kandaurov I., Polosatkin S., Postupaev V., Sinitsky S., Shoshin A., Timofeev I., Tsidulko Yu. // Fusion Sci. Technology. 2013. V. 63. P. 46. <https://doi.org/10.13182/FST13-A16872>
8. Будкер Г.И., Мирнов В.В., Рютов Д.Д. // Будкер Г.И. Собрание трудов. М.: Наука, 1982. С. 113.
9. Be'ery I., Gertsman A., Seeman O. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60. P. 115004. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aadd69>
10. Beklemishev A.D. // Fusion Sci. Technol. 2013. V. 63. P. 355.
11. Beklemishev A.D. // AIP Confer. Proc. 2016. V. 1771. P. 040006. <https://doi.org/10.1063/1.4964191>
12. Ivanov I., Ustyuzhanin V., Sudnikov A., Inzhevatkina A. // J. Plasma Phys. 2021. V. 87 P. 845970201. <https://doi.org/10.1017/S0022377821000131>
13. Postupaev V.V., Sudnikov A.V., Beklemishev A.D., Ivanov I.A. // Fusion Engineering Design. 2016. V. 106. P. 29. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.03.029>
14. Sudnikov A.V., Beklemishev A.D., Postupaev V.V., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Vasilyeva N.G., Kuklin K.N., Sidorov E.N. // Fusion Engineering Design. 2017. V. 122. P. 85. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.09.005>
15. Sudnikov A.V., Beklemishev A.D., Postupaev V.V., Ivanov I.A., Inzhevatkina A.A., Sklyarov V.F., Burdakov A.V., Kuklin K.N., Rovenskikh A.F., Melnikov N.A. // Plasma Fusion Res. 2019. V. 14. P. 2402023. <https://doi.org/10.1585/pfr.14.2402023>
16. Sudnikov A., Beklemishev A., Inzhevatkina A., Ivanov I., Postupaev V., Burdakov A., Glinskiy V., Kuklin K., Rovenskikh A., Ustyuzhanin V. // J. Plasma Phys. 2020. V. 86. P. 905860515. <https://doi.org/10.1017/S0022377820001245>
17. Inzhevatkina A.A., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Postupaev V.V., Sudnikov A.V. // Plasma Fusion Res. 2019. V. 14. P. 2402020. <https://doi.org/10.1585/pfr.14.2402020>
18. Etherton R.C., Beyer L.M., Maddox W.E., Bridwell L.B. // Phys. Rev. A. 1970. V. 2. P. 2177. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.2.2177>
19. Иванов И.А., Бурдаков А.В., Ровенских А.Ф., Сидоров Е.Н. // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 2. С. 100.
20. Гурко В.Ф., Квашинин А.Н., Хильченко А.Д. // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 5. С. 32.