

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 533.9.082

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
В МАГНИТНОМ СОПЛЕ МАКЕТА БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО
ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ© 2024 г. Е. Ю. Брагин^а, *, Е. А. Бунин^а, С. С. Гусев^а, В. А. Жильцов^а,
М. Н. Казеев^а, Д. В. Камин^а, В. Ф. Козлов^а, С. В. Коробцев^а,
И. А. Костриченко^а, Д. С. Кутузов^а, А. В. Спицын^а, А. Е. Сухов^а,
Д. О. Шуровский^а, С. В. Янченков^а^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

*e-mail: bragin_ey@nrcki.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 15.05.2024 г.

Принята к публикации 13.06.2024 г.

Предлагается подход к созданию диагностического комплекса для исследования основных плазменных процессов (ускорение и срыв плазменного потока с силовых линий магнитного поля) в магнитном сопле безэлектродного плазменного ракетного двигателя. Описывается диагностический комплекс стенда ПН-3, макета безэлектродного плазменного ракетного двигателя, при создании которого был реализован данный подход.

DOI: 10.31857/S0032816224040158 EDN: NYEFDD

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особую актуальность приобрела задача поиска альтернативы химическим ракетным двигателям для межпланетных перелетов в связи с малым удельным импульсом последних. Таким двигателем может стать безэлектродный плазменный ракетный двигатель (БПРД) мощностью от сотен киловатт до десятков мегаватт с ядерным реактором в качестве источника энергии [1].

Рабочий газ, двигаясь в БПРД, принципиально проходит через три ступени двигателя: геликонный источник плазмы (ГИП), блок ионно-го циклотрон-резонансного нагрева (ИЦРН) и магнитное сопло (МС). В ГИП происходит ионизация рабочего газа и формируется истекающий плазменный поток. В блоке ИЦРН происходит нагрев ионов плазменного потока до температуры в сотни электронвольт. В МС

происходит формирование истекающей реактивной струи, а также вырабатываются создаваемые двигателем тяга и удельный импульс. Все три блока связаны между собой единой конфигурацией магнитного поля, которое не только обеспечивает термоизоляцию плазменного потока от стенок двигателя, но и принимает непосредственное участие в плазменных процессах, протекающих во всех трех ступенях двигателя.

Основными характеристиками любого ракетного двигателя являются создаваемые им тяга F_t и удельный импульс I_c :

$$F_t = G\bar{v}\eta_{\text{рт}} \cos \bar{\alpha}, \quad (1)$$

$$I_c = \frac{1}{g}\bar{v}\eta_{\text{рт}} \cos \bar{\alpha}, \quad (2)$$

где G — массовый расход рабочего тела, $\bar{v}$ и $\bar{\alpha}$ — средняя скорость и угол движения частиц рабочего тела, $\eta_{\text{рт}}$ — коэффициент использования

рабочего тела, g — ускорение свободного падения. Таким образом, тяга и удельный импульс, создаваемые БПРД, зависят от скорости, до которой будут ускорены ионы истекающего плазменного потока, доли рабочего газа, ставшей частью истекающего плазменного потока, и угла, под которым они сорвутся с силовых линий магнитного поля.

Стоит задача исследования плазменных процессов, протекающих в МС БПРД, с целью их оптимизации, направленной на увеличение эффективности ускорения ионов плазменного потока и уменьшение угла их срыва с силовых линий магнитного поля. Эти процессы сильно отличаются от процессов, протекающих в традиционных электрических ракетных двигателях (стационарном плазменном и ионном двигателях), а значит для их исследования требуется разработать специализированный диагностический комплекс, достаточный для проведения всесторонних исследований плазменных процессов в МС БПРД.

В данной статье описывается диагностический комплекс стенда ПН-3, предлагаемый в качестве типового для исследования плазменных процессов в МС БПРД.

2. БЕЗЭЛЕКТРОДНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Принципиальная схема БПРД приведена на рис. 1.

Основой БПРД служит газоразрядная камера (ГРК), изготовленная из вакуум-плотного радиопрозрачного материала (кварц, алунд

и т.д.). ГРК соосно помещена в магнитную систему. Поверх камеры размещены ВЧ-антенны (геликонная и ИЦР). С торца ГРК подается рабочий газ, который благодаря градиенту давления движется вдоль камеры и попадает в ГИП. ВЧ-антенной внутри ГРК возбуждаются геликонные волны, которые, поглощаясь электронами, нагревают их (вплоть до десятков эВ). Нагретые электроны, будучи замагниченными, двигаются вдоль силовых линий магнитного поля, находясь в потенциальной яме, образованной положительным потенциалом внутри источника плазмы относительно нулевого потенциала на бесконечности; затем электроны сталкиваются с атомами рабочего газа и ионизуют их, выбивая новые электроны. Имеет место лавинообразная ионизация, приводящая к образованию плазмы плотностью до 10^{14} см^{-3} [2].

Образовавшийся плазменный поток истекает из ГИП вдоль силовых линий магнитного поля со скоростью ионного звука и попадает в блок ИЦРН. Здесь через ИЦР-антенну внутрь ГРК вновь вводятся ВЧ-волны, которые на этот раз поглощаются ионами при выполнении условия ионного циклотронного резонанса (ИЦР):

$$\omega = \omega_{ic} = \frac{qB}{M}, \quad (3)$$

где ω — частота вводимой ВЧ-волны, ω_{ic} — частота ионного циклотронного вращения, q и M — заряд и масса ионов, B — величина индукции магнитного поля. Поскольку поглощенная ВЧ-энергия вкладывается в циклотронное вращение ионов, это не приводит к продольному

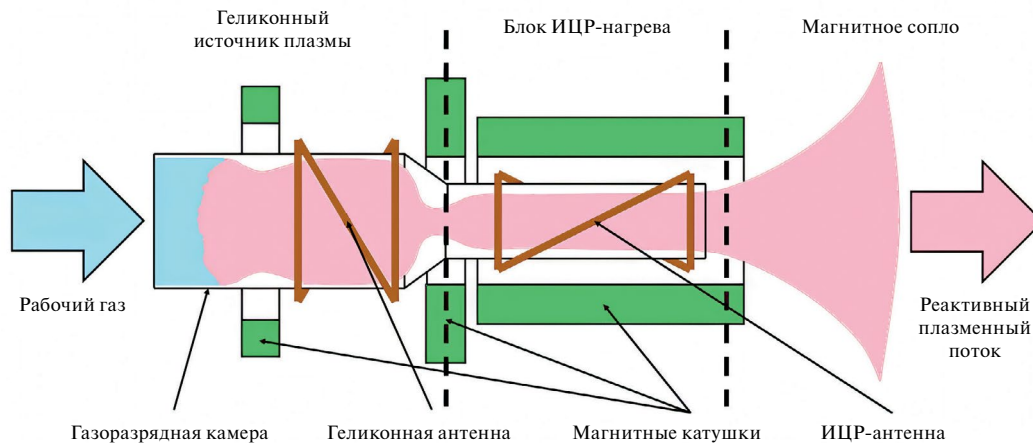


Рис. 1. Принципиальная схема классического БПРД.

ускорению плазменного потока, и он продолжает свое движение со скоростью ионного звука.

Покидая блок ИЦРН, плазменный поток попадает в МС, представляющее собой естественную конфигурацию магнитного поля, возникающую при удалении от магнитных катушек. Именно в магнитном сопле происходит продольное ускорение плазменного потока, а также его срыв с силовых линий магнитного поля, тем самым происходит создание тяги и удельного импульса.

Все три блока объединены между собой единой конфигурацией магнитного поля, которая не только обеспечивает термоизоляцию плазменного потока от ГРК за счет замагниченности ионов и электронов, но также является необходимым условием для поглощения ВЧ-волн электронами и ионами, ускорения ионов, а также формирует магнитное сопло.

3. МАГНИТНОЕ СОПЛО

Интерес представляют протекающие в МС процессы ускорения и срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля. Ускорение плазменного потока в МС БПРД в основном идет за счет двух механизмов: диамагнитного выталкивания и потенциального ускорения.

Как известно, плазма является диамагнетиком, а значит ее частицы будут выталкиваться, ускоряться в направлении уменьшения магнитного поля. Это будет приводить к увеличению радиуса и уменьшению скорости их циклотронного вращения. Уменьшение скорости будет происходить так, чтобы выполнялся закон первого магнитного инварианта:

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = \text{const}, \quad (4)$$

где $E_{\perp}$ — энергия поперечного вращения частиц плазмы, B — величина индукции магнитного поля. Уменьшение энергии вращательного движения частиц плазмы, благодаря закону сохранения энергии, приводит к увеличению энергии их направленного движения.

Таким образом, ионы плазменного потока при диамагнитном выталкивании ускоряются за счет преобразования энергии их вращательного движения, которую в них вложили в блоке ИЦРН, в энергию их продольного движения. При этом коэффициент преобразования

поперечной энергии в продольную в соответствии с формулой (4) обратно пропорционален B , т.е. для того, чтобы произошло преобразование 99% вращательной энергии, магнитное поле должно ослабнуть в 100 раз.

Однако некоторые теоретические расчеты [3] показывают, что в блоке ИЦРН только часть энергии вкладывается в ионы, а вторая же часть вкладывается в электроны. В этом случае ускорение ионов плазменного потока идет за счет второго механизма — потенциального. Поскольку электроны на несколько порядков легче ионов, скорость их движения будет существенно превышать скорость ионов, а значит, они будут покидать плазму быстрее ионов. В итоге, в плазме будет накапливаться положительный заряд, а значит, плазма будет приобретать положительный потенциал. Ионы, скатываясь с этой потенциальной горки, будут ускоряться, а электроны, взбираясь на нее, будут замедляться. Этот потенциал будет расти до тех пор, пока скорость уходящих из плазмы ионов и электронов не сравняется.

Таким образом, вдоль движения плазменного потока формируется распределение плазменного потенциала, у которого наблюдаются максимум в блоке ИЦРН и равное нулю значение на бесконечности (стенке экспериментальной камеры). В зависимости от условий спад потенциала (ускорение ионов) может быть как быстрым (при образовании так называемого двойного слоя [4]), т.е. происходящим на расстояниях, измеряемых в единицах радиусов Дебая, так и медленным [5], т.е. происходящим на расстояниях, равных тысячам радиусов Дебая.

Подытоживая сказанное выше, можно сделать вывод о том, что для экспериментального исследования ускорения плазменного потока в МС следует:

- определить, какая доля вводимой ВЧ-мощности вкладывается в ионы, а какая — в электроны;
- отслеживать динамику ускорения ионов вдоль МС (в том числе и пространственное распределение плазменного потенциала);
- измерять конечную скорость (энергию продольного движения), которой достигнут ионы, ускорившись в МС.

Вторым важным процессом, протекающим в МС, является срыв плазменного потока

с силовых линий магнитного поля. Как известно, все силовые линии замкнуты. Таким образом, плазменный поток, вытекая из БПРД и двигаясь вдоль силовых линий, в какой-то момент времени должен развернуться в обратном направлении, а значит, ни тяги, ни удельного импульса вырабатываться не должно. Однако в реальности этого не происходит. Ионы плазменного потока срываются с изогнутых силовых линий магнитного поля и продолжают свое движение по прямолинейной траектории, образуя реактивную струю. Чем быстрее произойдет этот срыв, тем меньше успеют разойтись силовые линии, тем меньше будет угол срыва плазменного потока, а значит, тем большая часть энергии ионов внесет свой вклад в создание тяги и удельного импульса.

Существует несколько теорий, описывающих механизм срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля [6], но их рассмотрение выходит за рамки данной статьи. Однако вне зависимости от причин срыва следует определить, что конкретно следует считать срывом плазменного потока с силовых линий магнитного поля и какие параметры срыва нам следует исследовать.

Будем считать, что происходит срыв плазменного потока с силовой линии магнитного поля, вдоль которой он начал свое движение, если траектория движения потока перестает совпадать с ней в том ее состоянии, в котором она находилась до появления плазменного потока. Точку пространства, в которой появляется это расхождение, назовем локальной точкой срыва, а совокупность локальных точек срыва со всех

силовых линий МС назовем поверхностью срыва. Таким образом, построив двумерную карту расширяющегося в МС плазменного потока и сравнив ее с рассчитанной или измеренной картиной силовых линий МС, можно найти поверхность срыва истекающего плазменного потока.

Сорвавшись с силовой линии, ионы плазменного потока продолжают свое движение по прямолинейной траектории с постоянным углом к оси МС, величина которого равна величине угла наклона касательной к силовой линии в точке срыва. Таким образом, отойдя на расстояние, гарантирующее, что срыв плазменного потока уже состоялся, и измерив угол движения ионов в конкретной точке пространства, мы получим локальный угол срыва ионов. Получив радиальное распределение этой величины и найдя ее среднеинтегральное значение по всем ионам потока, мы получим угол срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля. При этом, чем дальше силовая линия находится от оси МС, тем больше у нее кривизна, следовательно, под большим углом при прочих равных произойдет срыв, но благодаря колоколообразному радиальному профилю плотности плазмы меньшее число частиц движется вдоль нее.

Подытоживая все сказанное выше, с точки зрения изучения протекающих плазменных процессов, всю область исследования в МС можно разделить на 3 области, схематично изображенные на рис. 2.

Область I находится непосредственно за ИЦР-антенной. Основная цель исследований в этой области заключается в определении входных параметров плазменного потока (степени ионизации и радиальных распределений основных плазменных параметров), его полного энергосодержания, а также в определении долей энергии, вложенных в ионы и в электроны.

Область II представляет собой всю протяженность МС. В этой области измеряются локальные параметры истекающего потока (величина плазменного потока, плотность и электронная температура плазмы, плазменный потенциал, функция распределения ионов по энергиям и другие) и составляются двумерные (а лучше трехмерные) карты этих параметров, на основании которых определяются поверхность срыва и сценарий ускорения ионов, исследуются

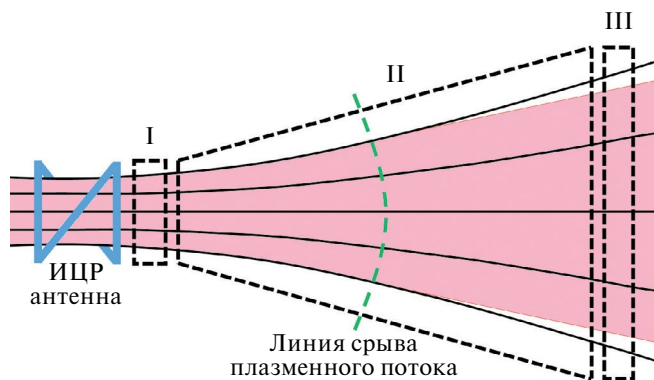


Рис. 2. Области исследования плазменных процессов, протекающих в магнитном сопле.

другие протекающие в плазме процессы, например газовые.

Область III находится на достаточном удалении от горловины сопла, гарантирующем срыв. Здесь измеряются угол срыва плазменного потока, итоговая функции распределения ионов по энергиям, создаваемая двигателем тяга, определяется компонентный состав ионов плазмы и прочее.

4. СТЕНД ПН-3 КАК МАКЕТ БПРД

Описанный далее диагностический комплекс создан на стенде ПН-3. Стенд ПН-3 является макетом БПРД и имеет все три присущие БПРД блока: ГИП, блок ИЦРН и МС. Основой стенда является ГРК, выполненная из кварцевой трубы внутренним диаметром 60 мм и длиной 1500 мм. На трубе размещены ВЧ-антенны, а сама труба помещена во внешнее магнитное поле, создаваемое магнитными катушками.

На торце ГРК располагается газовый объем, через который в ГРК поступает рабочий газ (H_2 , Ar, Ne или другие). Рабочий газ, двигаясь вдоль ГРК, попадает в ГИП, где происходит его ионизация ВЧ-методом. ВЧ-энергия вводится в ГРК от ВЧ-генератора с частотой 10 МГц и мощностью до 20 кВт при помощи полуволновой винтовой антенны. Дальше по ГРК движется уже плазменный поток.

Далее плазменный поток попадает в блок ИЦРН, где в газоразрядную камеру дополнительно вводится до 10 кВт ВЧ-мощности на частоте 1.8 МГц. Даная частота является резонансной для циклотронного вращения ионов водорода при магнитном поле 1115 Гс, которое обеспечивается магнитной системой стенда ПН-3 в области ИЦР-антенны. Таким образом, на стенде ПН-3 можно осуществлять ИЦР-нагрев только ионов водорода, но дополнительный вклад энергии в электронную компоненту плазмы для исследования потенциального механизма ускорения можно осуществлять при любом рабочем газе.

Далее плазменный поток покидает ГРК и попадает в вакуумную камеру, служащую для имитации вакуумных условий космического пространства. В ней располагается большая часть МС; вакуумная откачка рабочего газа из камеры осуществляется мощным криогенным насосом. Камера представляет собой цилиндрический

объем с внутренним диаметром 1.2 м и длиной 4 м. На входе в МС на торце ГРК располагается диагностический объем, предназначенный для установки различных плазменных диагностических устройств для исследования параметров плазменного потока на входе в МС.

Магнитная система стенда состоит из 8 магнитных катушек с независимым питанием: 4 катушки расположены в зоне ГРК, они служат для создания конфигурации магнитного поля в ГИП и блоке ИЦРН, другие 4 катушки расположены в вакуумной камере, они служат для профилирования МС. Все это позволяет менять профиль и величину магнитного поля на стенде в очень широком диапазоне.

На рис. 3 приведена принципиальная схема стенда ПН-3:

Режим работы на стенде импульсный при непрерывных вакуумной откачке и напуске рабочего газа. Стандартная продолжительность импульса 3 с со скважностью 10.

5. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СТЕНДА ПН-3

В соответствии с описанными выше областями исследования диагностический комплекс стенда ПН-3 также можно разделить на 3 независимые части, в каждой из которых используется свой набор плазменных диагностических устройств, предназначенных для проведения требуемых исследований.

5.1. Горловина магнитного сопла (область исследования I)

В горловине магнитного сопла требуется получать радиальные распределения плотности и электронной температуры плазмы, измерять степень ионизации плазменного потока, отслеживать изменение его полного энергосодержания, а также определять, в какую именно компоненту плазменного потока вкладывается энергия.

Область исследования I на стенде ПН-3 расположена в так называемом диагностическом объеме. Его расположение показано на рис. 3. В этой области упор сделан на бесконтактный метод диагностики, так как любое возмущение плазмы отразится на всем плазменном потоке вниз по течению. Здесь установлено 5 независимых устройств для диагностики плазмы. Такая

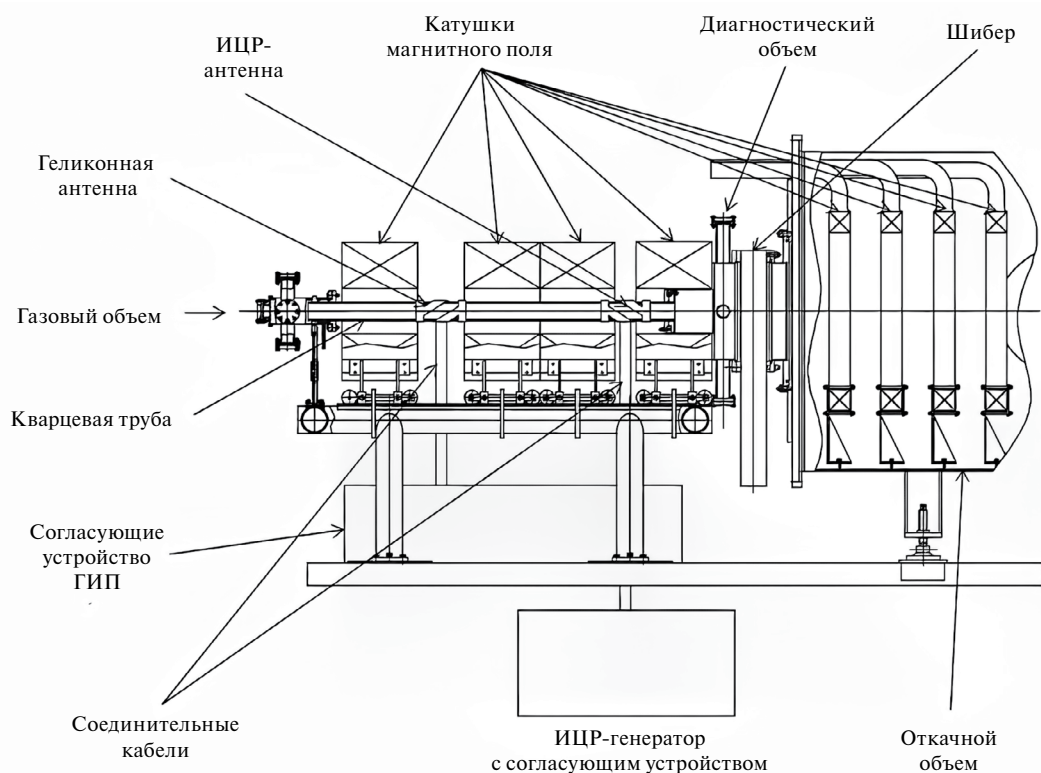


Рис. 3. Принципиальная схема стенда ПН-3.

концентрация диагностических устройств в одном сечении плазменного потока позволяет проводить измерения одних и тех же плазменных параметров несколькими способами и проводить их взаимную верификацию.

Принципиальная схема установки диагностических устройств для измерения параметров плазмы в диагностическом объеме стенда ПН-3 приведена на рис. 4.

Рассмотрим принцип действия каждого из описанных методов диагностики.

5.1.1. Лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ) является методом активной оптической диагностики, ее принцип действия основан на применении монохроматического излучения лазеров с целью стимулирования квантовых переходов между вполне определенными уровнями [7]. Методика ЛИФ позволяет проводить измерение концентрации и температуры различных частиц плазмы (атомов и ионов) с высокими спектральным, пространственным и временным разрешениями. Разделение объектов происходит за счет возбуждения различных переходов в атомах и ионах. Использование перестраиваемых по длинам волн лазеров с узкой

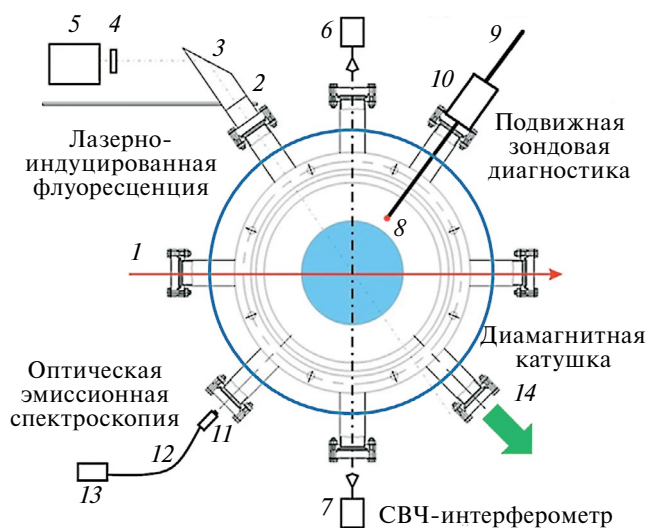


Рис. 4. Схема расположения диагностических устройств для измерения параметров плазмы в диагностическом объеме стенда ПН-3: 1 – вводимый лазерный луч, 2 – линза, 3 – зеркало, 4 – оптический фильтр, 5 – ФЭУ, 6 – приемник интерферометра, 7 – передатчик интерферометра, 8 – устройство для зондовой диагностики, 9 – подвижная штанга с МП, 10 – уплотняющее устройство с дифференциальной откачкой, 11 – коллиматор, 12 – оптический кабель, 13 – спектрометр или монохроматор, 14 – вакуумная откачка и вакууметрия.

линией лазера позволяет селективно возбуждать строго определенные переходы, тем самым обеспечивая взаимодействия исключительно с выбранными для диагностики объектами (атомами и ионами). В работах на стенде ПН-3 активно использовалась, к примеру, следующая схема для ионов аргона (ArII) (рис. 5): накачка флуоресцентного излучения осуществлялась из метастабильного состояния $3d^2G_{9/2}$ при помощи лазерной линии $\lambda_{\text{лазер}} = 611.5$ нм, при этом сигнал флуоресценции регистрировался на линии $\lambda_{\text{flu}} = 460.9$ нм (переход $4p^2F_{7/2} \rightarrow 4s^2D_{5/2}$). Для интерпретации флуоресцентного сигнала использовалась столкновительно-излучательная модель, подобная приведенным в работах [8, 9]. С помощью ЛИФ можно измерять распределение концентрации атомов и ионов плазмы вдоль лазерного луча.

Измерительный прибор на основе ЛИФ принципиально состоит из перестраиваемого лазера, создающего лазерный луч (позиция 1 на рис. 4), а также системы регистрации флуоресцентного излучения, состоящей из оптического тракта (позиции 2, 3 на рис. 4), оптического фильтра, выделяющего из всего спектра только флуоресцентное излучение, и ФЭУ (позиции 4, 5 на рис. 4).

С помощью ЛИФ в первой области исследования магнитного сопла можно изучать радиальные распределения концентрации атомов и ионов рабочего газа, а также следить за изменением этого распределения во время излучения импульса.

5.1.2. СВЧ-интерферометр. СВЧ-интерферометрия основана на приобретении электромагнитной волной дополнительного сдвига фазы при ее прохождении через плазменную мишень за счет изменения скорости распространения волны в плотной плазме [10]. Анализируя сдвиг фазы, можно определить линейную плотность плазменной мишени (интеграл локальной плотности плазмы по траектории движения электромагнитной волны), а анализируя изменение сдвига фаз во времени, можно определить изменение линейной плотности (или средней плотности по длине измеряемой хорды) плазменного потока на протяжении импульса.

Интерферометр принципиально состоит из синтезатора сигналов, передатчика и приемника (позиции 6, 7 на рис. 4). Синтезатор генерирует сигналы S_1 и S_2 с частотами $f_1 = 7.296$ ГГц

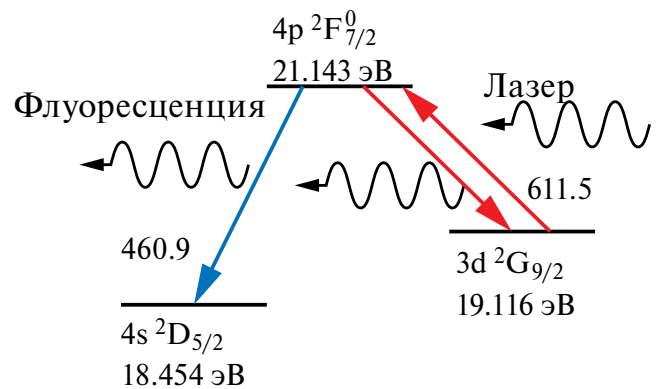


Рис. 5. Спектральная схема измерения ЛИФ для ионов аргона (ArII).

и $f_2 = 7.290$ ГГц. Сигнал S_1 направляется в передатчик, где после увеличения его частоты в 13 раз он излучается СВЧ-антенной в плазму, после которой приобретает сдвиг фаз и попадает в приемник. Сигнал S_2 напрямую попадает в приемник, где его частота также увеличивается в 13 раз. В приемнике расположен смеситель, в котором оба сигнала, S_1 и S_2 , сравниваются между собой. В результате этого сравнения генерируется сигнал S_3 на частоте $f_3 = 78$ ГГц, несущий информацию о приобретенном сдвиге фаз. Сигнал S_3 возвращается в синтезатор, где его частота понижается до 200 кГц, после чего сигнал отправляется на регистрацию на АЦП. Сдвиг фазы вычисляется в процессе постобработки данного сигнала.

Также в некоторых работах [11] при помощи СВЧ-интерферометрии оценивается изменение продольной скорости плазменного потока в данном сечении при вводе дополнительной мощности в блоке ИЦРН за счет изменения плотности плазмы при выполнении условия неразрывности плазменного потока

$$nv_{\parallel} = \text{const}, \quad (5)$$

5.1.3. Зондовые диагностические устройства. Если в плазму поместить проводящий объект (одиночный зонд Ленгмюра) и подать на него потенциал, то вокруг зонда образуется так называемый плазменный призондовый слой. Изменяя подаваемый потенциал и измеряя текущий через зонд (призондовый слой) ток, мы получим вольт-амперную характеристику (ВАХ) слоя. Из анализа ВАХ можно получить локальные значения таких основных параметров плазмы, как электронная температура, плотность плазмы, плазменный и плавающий потенциалы [12].

Если в плазму поместить два зонда сопоставимой площади, создав между ними разницу потенциалов, то мы получим двойной зонд Ленгмюра. Изменяя разницу потенциала между зондами и измеряя при этом текущий между ними ток, мы получаем ВАХ двойного зонда, из анализа которой можно получить электронную температуру и плотность плазмы [12].

Двойной зонд Ленгмюра сложнее в изготовлении, чем одиночный, однако он имеет большую устойчивость к синфазным наводкам и его проще использовать с точки зрения обработки экспериментальных данных. Принципиальные схемы измерения одиночным и двойным зондами Ленгмюра приведены на рис. 6.

Существует большое количество модификаций ленгмюровских зондов, каждая из которых оптимизирована под измерение определенных плазменных параметров. Также существуют специальные зонды, предназначенные для измерения таких плазменных параметров, как частота и интенсивность плазменных колебаний, число Маха и т.д.

Особое внимание следует уделить одной из модификаций так называемого ионного зонда (ion sensitive probe) [13]. Он представляет собой корпус, передняя стенка которого выполнена из мелкой сетки, внутрь него помещен коллектор. При измерении зонд располагается строго параллельно силовым линиям (принципиальную схему измерения см. на рис. 7). Тогда те электроны, которые теоретически могли бы попасть на коллектор, “гибнут” на корпусе. А ионы, ввиду того что их ларморовский радиус на несколько порядков больше электронного, способны пройти сквозь сетку и достигнуть коллектора. Это гарантирует то, что

на коллектор будет попадать чисто ионный поток. Подавая на зонд переменный положительный потенциал, мы создаем для ионов потенциальный барьер, аналогично тому, как это делается в сеточном анализаторе (см. ниже). Значит, измеряя при этом ток, текущий через коллектор, мы получим кривую запираания зонда, продифференцировав которую, мы найдем функцию распределения ионов по энергиям вращательного движения. Следует отметить, что коллектора достигнут только ионы, имеющие ларморовский радиус, превышающий расстояние от сетки до коллектора. Таким образом, существует минимальная вращательная энергия ионов, которую может зарегистрировать зонд. В реальных конструкциях зондов эта энергия обычно существенно ниже 1 эВ.

Перемещение зондовых диагностических устройств в диагностическом объеме осуществляется при помощи механического привода (МП), который приводит в движение штангу, на конце которой и установлены зонды (позиции 8 и 9 на рис. 4). Полный ход штанги составляет 300 мм. Малые размеры зондовых диагностических устройств позволяют одновременно размещать на штанге их несколько штук разных модификаций. Сохранение вакуума при движении штанги достигается за счет использования уплотняющего устройства с дифференциальной откачкой (позиция 10 на рис. 4). Скорость движения МП достигает 80 мм/с, что позволяет за один импульс снимать полное радиальное распределение. После проведения измерения диагностические устройства выводятся за границы плазменного потока.

При совместном использовании двойного ленгмюровского и ионного зондов можно

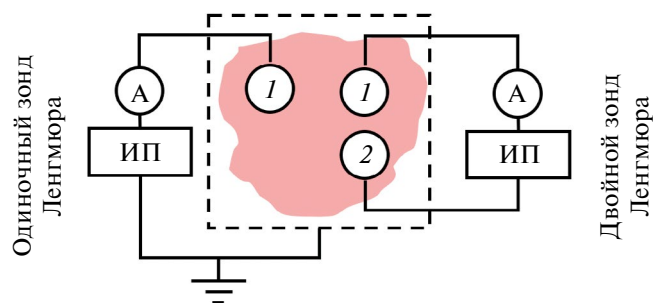


Рис. 6. Принципиальные схемы измерения одиночным и двойным зондами Ленгмюра.

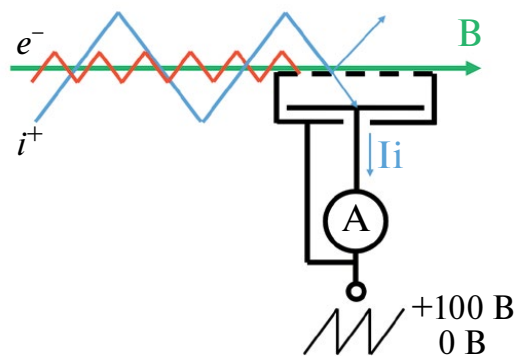


Рис. 7. Принципиальная схема измерения ионным зондом.

определять по изменению электронной температуры и функции распределения ионов по энергиям, в какую именно компоненту плазмы вкладывается в блоке ИЦРН ВЧ-мощность, а также построить радиальные распределения основных параметров плазменного потока (плотности и электронной температуры) в горловине МС.

5.1.4. Оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС) является методом пассивной оптической диагностики, основанной на анализе эмиссионных спектров излучения плазмы [14]. С помощью ОЭС можно определить такие основные параметры плазмы, как ее состав, температуру всех ее компонент, степень ионизации, а также изменение этих параметров на протяжении импульса.

Измерительный прибор на основе ОЭС принципиально состоит из коллиматора, оптического кабеля (оптоволокну) и оптического прибора (спектрографа или монохроматора), подключенного к системе регистрации данных (позиции *11–13* на рис. 4).

При помощи ОЭС можно определять степень ионизации плазменного потока [15], а по повышению соответствующих температур – в какую именно компоненту плазмы (ионы или электроны) вкладывается энергия в блоке ИЦРН.

5.1.5. Диамагнитная катушка представляет собой многовитковую катушку, охватывающую плазменный поток. С ее помощью можно отслеживать изменение энергосодержания плазменного потока [16].

Изменение энергосодержания плазменного потока приводит к изменению проходящего через катушку магнитного потока, что, в свою очередь, приводит к возникновению в ней ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_{si} \propto \frac{\partial}{\partial t} (n(T_{e\perp} + T_{i\perp})), \quad (6)$$

где n , $T_{e\perp}$ и $T_{i\perp}$ – усредненные по данному сечению плотность плазмы и поперечные температуры ее компонент.

При помощи диамагнитной катушки можно оценить, какое количество ВЧ-энергии было вложено в плазменный поток в ГИП и блоке ИЦРН.

5.2. Магнитное сопло (область исследования II)

На протяжении всего магнитного сопла требуется измерять такие локальные параметры истекающего потока, как величину плазменного потока, плотность и электронную температуру плазмы, плазменный потенциал, функцию распределения ионов по энергиям и другие. На основе этих измерений строятся двумерные карты, иллюстрирующие эволюцию этих параметров по мере истечения плазменного потока в магнитном сопле.

Проведение исследований в области II на стенде ПН-3 реализовано при помощи двух МП: продольного с полным ходом 1400 мм и поперечного (он установлен на конце стрелы продольного) с полным ходом 300 мм, установленных в откачном объеме (см. рис. 8).

Использование данных МП позволяет строить двумерные картины измеряемых плазменных параметров на протяжении всей интересующей нас области МС. В этой области упор следует сделать на малогабаритное диагностическое устройство, которое может быть размещено на МП. На рис. 9 приведена фотография диагностических устройств для измерения параметров плазмы второй и третьей областей исследования, а также МП в откачном объеме стенда ПН-3.

Остановимся на каждой из них поподробней.

5.2.1. Линейка одиночных зондов Ленгмюра. Если на проводящий предмет (одиночный зонд), помещенный в плазменный поток, подать большой отрицательный потенциал, то ток, текущий через него, будет пропорционален величине плазменного потока ($nvi_{\parallel}$). Массив таких зондов называется линейкой, этот массив позволяет снимать радиальное распределение за один импульс (если поставить линейку перпендикулярно оси установки).

Также зонды могут использоваться как классические зонды Ленгмюра, что позволит получать радиальное распределение таких основных параметров плазмы, как плотность, электронная температура плазмы, плазменные и плавающий потенциалы.

Поскольку диаметр плазменного потока существенно меняется при расширении в МС, вблизи горловины сопла плазма будет попадать

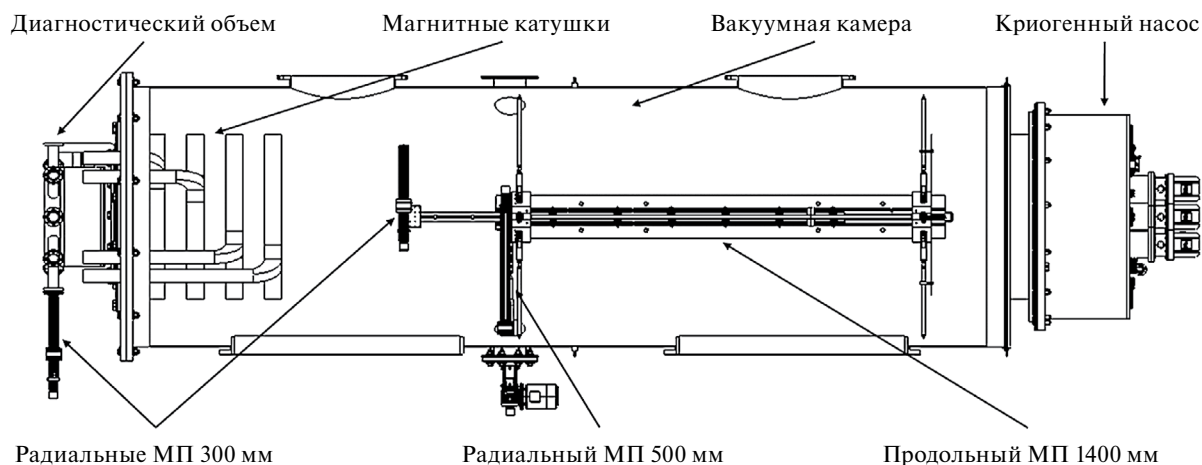


Рис. 8. Общая схема вакуумной камеры стенда ПН-3 и расположения механизированных приводов (вид сверху).



Рис. 9. Фотография диагностических устройств для измерения параметров плазмы и МП в откачном объеме стенда ПН-3 (вторая и третья область исследования).

не на все зонды, а лишь на часть из них. Значит, для повышения разрешения получаемого радиального распределения следует уменьшить шаг между зондами в приосевой области измерения, плавно увеличивая его при приближении к периферии (адаптивный шаг).

При помощи линейки одиночных зондов Ленгмюра, перемещаемой вдоль оси МС, можно получить двумерную карту величины плазменного потока, при сравнении которой с двумерной картой величины индукции магнитного поля можно определить линию срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля. Также можно получить двумерные карты основных плазменных характеристик и параметров колебаний плазмы, что позволит исследовать протекание многих плазменных процессов.

5.2.2. Сеточный анализатор — это один из видов энергетических анализаторов, в котором сепарация частиц по энергиям построена на принципе их способности преодоления потенциального барьера.

Классический сеточный анализатор принципиально состоит из четырех сеток, на которые подаются различные потенциалы. Первая сетка либо заземляется, либо остается под плавающим потенциалом. Она предназначена для физического разделения потенциала плазменного потока от потенциала, возникающего внутри анализатора. На вторую сетку подается запирающий отрицательный потенциал, препятствующий прохождению через нее электронов. На третью сетку подается переменный положительный потенциал, который и производит

сепарацию ионов по энергиям (сетку могут преодолеть только те ионы, энергия которых выше потенциала сетки). На четвертую сетку подается относительно небольшой отрицательный потенциал, служащий для предотвращения выбивания электронов из коллектора. Частицы, сумевшие преодолеть все сетки, попадают на коллектор. Зависимость тока, текущего через коллектор, от потенциала третьей (запирающей ионы) сетки называется кривой запираения анализатора. При ее дифференцировании получается функция распределения ионов по энергиям. Принципиальная схема сеточного анализатора приведена на рис. 10.

Основными преимуществами сеточного анализатора по сравнению с другими типами энергоанализаторов являются его компактность и нечувствительность к магнитным полям. Таким образом, если перемещать анализатор вдоль какой-либо силовой линии (например, вдоль оси стэнда), то можно проследить эволюцию функции распределения ионов по энергиям при их ускорении в МС.

5.2.3. Тягомер. Одна из основных характеристик любого ракетного двигателя — это создаваемая им тяга. Для непосредственного измерения тяги используют тягомеры. Ввиду больших массогабаритных размеров макетов БПРД наиболее целесообразно измерять локальную плотность тяги (тягу, создаваемую плазменным потоком с единичной площадью сечения), проинтегрировав которую по всей площади сечения плазменного потока, мы получим полную создаваемую тягу.

В качестве такого тягомера предлагается использовать модель, основанную на тензодатчике. К преимуществам такого тягомера можно отнести малые размеры, большую точность и универсальность метода измерения.

Такой тягомер принципиально состоит из мишени, прикрепленной посредством штанги к тензодатчику, жестко закрепленному на неподвижном корпусе. Площадь мишени (и длина штанги) выбираются, исходя из ожидаемой плотности тяги и чувствительности тензодатчика. 3D-модель одной из конструкций такого тягомера приведена на рис. 11.

Перемещение такого тягомера вдоль оси установки с обеспечением возможности получения радиального распределения плотности тяги в каждом сечении позволит не только измерить

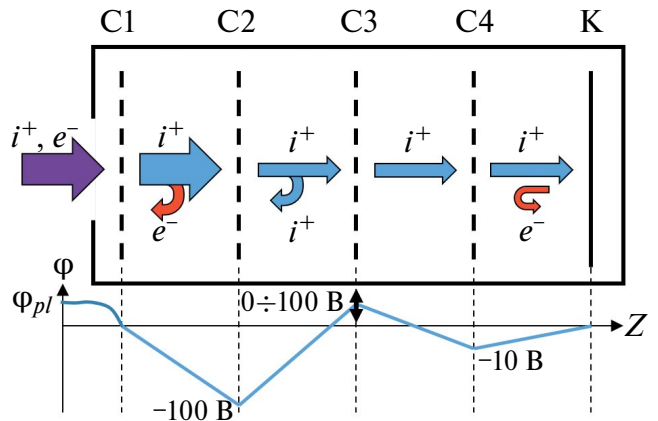


Рис. 10. Принципиальная схема сеточного анализатора.



Рис. 11. 3D-модель угломера с указанием основных элементов.

создаваемую макетом двигателя тягу, но и получить представление о том, как изменяется скорость потока (см. формулу (1)) по мере того, как происходит ускорение ионов в МС.

5.2.4. Другие возможные методы диагностики. Рассмотренные методы диагностики не способны охватить все разнообразие происходящих в МС плазменных процессов. В частности, это касается плазменных колебаний. Для их исследования применяются различные модификации

магнитных и электростатических зондов. Анализ двумерных карт частотно-амплитудных характеристик плазменных колебаний не только позволил бы пролить свет на развивающиеся в МС неустойчивости, но, возможно, дал бы нам дополнительную информацию о процессах ускорения и срыва плазменного потока.

В этой области можно применять и специальные зонды. Например, с помощью ионного зонда, описанного выше, можно отслеживать, как меняется функция распределения ионов по вращательным энергиям вдоль оси МС; с помощью зондов Маха можно отслеживать, как растет число Маха (отношение скорости плазменного потока к локальной скорости ионного звука) и т.д.

Также здесь можно использовать и оптические методы диагностики, описанные выше. Особый интерес представляет использование ЛИФ для измерения скорости плазменного потока [17, 18]. Скорость определяется по доплеровскому сдвигу, который “набегает”, когда плазменный поток движется навстречу (или в противоположном направлении) лазерному лучу. Если направить перестраиваемый по длине волны лазерный луч вдоль оси стенда и регистрировать индуцированную им флюоресценцию вдоль него, то можно отслеживать, как будет ускоряться плазменный поток при его распространении в МС.

5.3. За магнитным соплом (область исследования III)

За магнитным соплом, где гарантирован срыв плазменного потока с силовых линий магнитного поля, требуется измерять угол срыва плазменного потока, итоговую функцию распределения ионов по энергиям, создаваемую двигателем тягу, а также определять компонентный состав ионов плазмы.

В области исследования III можно располагать массивные, габаритные, контактные, чувствительные к воздействию магнитного поля измерительные приборы, а также методы диагностики, требующие гарантированного срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля.

Исследование в этой области МС на стенде ПН-3 реализовано за счет использования радиального МП с полным ходом 500 мм,

закрепленного на неподвижной части (станине) продольного МП (см. рис. 8, 9). Также массивные измерительные приборы, которые не требуют перемещения, ставятся прямо на дно откачного объема.

В этой области располагаются несколько диагностических устройств. Обсудим каждое из них в отдельности.

5.3.1. Угломер. Сорвавшись с силовых линий магнитного поля, ионы плазменного потока движутся по прямолинейным траекториям. Для измерения локального угла этого движения ионов используется угломер. Он представляет собой щелевой канал (коллиматор), вращающийся вокруг оси, расположенной на одном из его торцов. Напротив другого торца располагается коллектор. Если ось канала совпадает с направлением движения ионов, то они, пройдя весь канал, попадают на коллектор; в противном случае ионы ударяются в одну из стенок. Величина тока, текущего через коллектор, будет пропорциональна числу частиц, двигающихся под данным углом. Принципиальная схема угломера приведена на рис. 12.

Получив радиальное распределение локальных углов движения ионов при помощи МП и проинтегрировав его по площади сечения сопла, мы получаем среднеинтегральный угол движения частиц. А при условии, что к этому моменту все ионы успели сорваться с силовых линий магнитного поля, этот угол будет равен углу срыва плазменного потока.

5.3.2. Цилиндрический электростатический анализатор (ЦЭА) – это энергоанализатор, принцип действия которого основан на уравновешивании центробежного ускорения, действующего на заряженную частицу, движущуюся между двумя цилиндрическими обкладками конденсатора, возникающего при искривлении траектории частицы под действием силы

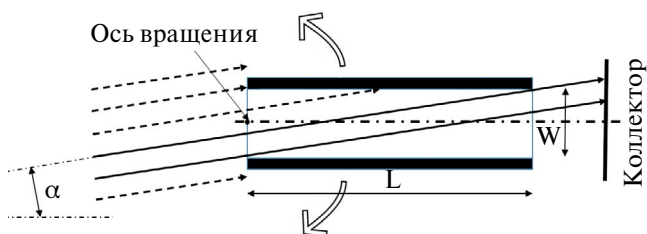


Рис. 12. Принципиальная схема угломера.

Кулона. Если центробежное ускорение уравновешено, то частицы проходят по дуге сквозь анализатор и попадают на коллектор; в противном случае частицы “выходят” на одну из обкладок конденсатора. Меняя разность потенциалов на обкладках конденсатора и измеряя ток на коллекторе, мы получаем функцию распределения ионов по энергиям. Принципиальная схема измерения ЦЭА приведена на рис. 13.

ЦЭА, имеющий хорошую разрешающую способность, чувствителен к внешним магнитным полям и имеет значительные габаритные размеры. Таким образом, его можно использовать только в третьей области исследования, где магнитные поля уже существенно ослаблены.

5.3.3. Другие возможные методы диагностики.

Строго говоря, именно в третьей области следует измерять создаваемую двигателем тягу, так как ионы к этому моменту уже приобретают максимальную скорость и движутся под постоянным углом. Однако локальная плотность тяги в этой области крайне мала, так как плазменный поток успевает сильно расшириться. Решением может стать использование мишени, перекрывающей весь плазменный поток (или хотя бы значительную его часть).

Наряду с ЦЭА, в этой области можно использовать и другие анализаторы, имеющие большие габариты и чувствительность к магнитным полям, например массанализаторы (времяпролетный или магнитный). Применение

массанализаторов поможет определить массовый состав распространяющейся в МС плазмы и убедиться в отсутствии примесей, которые могут негативно повлиять на интерпретацию полученных экспериментальных данных.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стоит задача исследования плазменных процессов, протекающих в магнитном сопле безэлектродного плазменного ракетного двигателя, с целью их оптимизации. С точки зрения создания тяги и удельного импульса, нас интересуют процессы ускорения и срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля.

С точки зрения изучения этих процессов, магнитное сопло можно разделить на три независимые области исследования. Область I находится непосредственно в горловине сопла. В ней определяются входные (начальные) параметры плазменного потока. Также в ней определяются полная энергоемкость расширяющегося плазменного потока и распределение этой энергии между компонентами плазмы (ионами и электронами). Область II тянется на протяжении всего магнитного сопла. Здесь строятся двумерные карты всевозможных параметров плазмы, на основе анализа которых определяются поверхность срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля и сценарий его ускорения, а также проводится исследование других плазменных процессов. Область исследования III находится на расстоянии от горловины сопла, гарантирующем срыв плазменного потока. Здесь измеряются угол его срыва, итоговая функция распределения ионов по энергиям, создаваемая двигателем тяга и прочее.

Исходя из этих соображений на стенде ПН-3 создан диагностический комплекс для исследования плазменных процессов в магнитном сопле БПРД. Согласно описанным выше областям исследования, диагностический комплекс также можно разбить на три независимые части.

Область исследования I на стенде ПН-3 располагается в диагностическом сопле. Здесь расположены измерительные приборы, принцип действия которых основан на методах лазерно-индуцированной флуоресценции, эмиссионной спектроскопии, СВЧ-интерферометрии, а также диамагнитная катушка и двойной ионный зонды, передвигаемые по радиусу при помощи механического привода. Данные методы

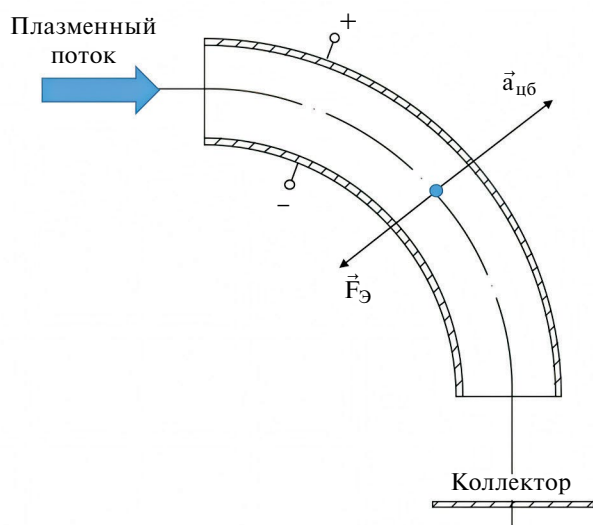


Рис. 13. Принципиальная схема цилиндрического электростатического анализатора.

диагностик позволяют определить степень ионизации плазменного потока (ОЭС), построить радиальные профили плотности и электронной температуры плазмы (ЛИФ и двойной зонд), оценить энергию, вложенную в плазменный поток (диамагнитная катушка), определить в какие компоненты плазменного потока эта энергия вложена (ОЭС и зонды).

Основой исследований в области II служит система из двух механизированных приводов, позволяющих прецизионно перемещать плазменные диагностические устройства по всему МС. На них располагаются линейка зондов Ленгмюра, сеточный анализатор и тягомер. С их помощью строятся двумерные карты локальных параметров плазменного потока, на основе которых можно определить поверхность срыва (линейка зондов Ленгмюра) и сценарий ускорения (сеточный анализатор) плазменного потока, а также создаваемую двигателем тягу (тягомер).

В области исследования III, которая располагается за магнитным соплом на расстоянии, гарантирующем срыв плазменного потока с силовых линий магнитного поля, расположены такие плазменные измерительные приборы, как угломер и цилиндрический электростатический анализатор. С их помощью измеряются угол срыва плазменного потока и итоговая функция распределения ионов по энергиям.

Реализованный диагностический комплекс позволяет проводить полноценные самостоятельные исследования указанных плазменных процессов (ускорение и срыв плазменного потока), измерять такие параметры плазменного двигателя, как создаваемая им тяга, угол срыва плазменного потока, а также коэффициент использования рабочего тела. Рассмотренный комплекс может быть взят за основу при создании диагностических комплексов, нацеленных на исследования плазменных процессов в магнитном сопле безэлектродного плазменного ракетного двигателя.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жильцов В.А., Кулыгин В.М. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. №. 3. С. 5.
<https://doi.org/10.21517/0202-3822-2018-41-3-5-20>
2. Isayama S., Shinohara S., Hada T. // Plasma Fusion Res. 2018. V. 13. 3. 1101014.
<https://doi.org/10.1585/pfr.13.1101014>
3. Ilin A.V., Chang Díaz F.R., Squire J.P., Tarditi A.G. // 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno. NV. 2004.
<https://doi.org/10.2514/6.2004-151>
4. Charles C. // Plasma Sources Sci. Technol. 2007. V. 16. № 4. P. R1.
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/16/4/R01>
5. Olsen C.S. Experimental Characterization of Plasma Detachment from Magnetic Nozzles. Houston: Rice University, 2013.
6. Longmier B.W., Bering III E.A., Carter M.D. et al. // Plasma Sources Sci Technol. 2011. V. 20. P. 015007.
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/20/1/015007>
7. Летохов В.С. Чеботаев В.П. Принципы нелинейной лазерной спектроскопии. Москва: Наука, 1975.
8. Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion / Ed.by D.E. Post, R. Behrisch. Boston: Springer, 1986. P. 211.
https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0067-1_6
9. Кутузов Д.С., Москаленко И.В., Брагин Е.Ю., Жильцов В.А., Янченков С.В. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 9. С. 698.
<https://doi.org/10.1134/S036729211809007X>
10. Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Дрозд А.С., Сергеев Д.С., Сухов А.Е. // Сб. трудов VIII Международной конференции “Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022”. Москва: НИЯУ “МИФИ”, 2022. С. 134.
11. Davis C., Gilchrist B., Squire J. // J. Propuls. Power. 2011. V. 27. № 2. P. 461.
<https://doi.org/10.2514/1.48087>
12. Алексеев Б.В., Котельников В.А. Зондовый метод диагностики плазмы. Москва: Энергоатомиздат, 1988.
13. Hsieh T.-Y., Kawamori E., Nishid Y. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 023502.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4790175>
14. Зобнин А.В., Исакаев Э.Х., Чиннов В.Ф. // ТВТ. 1998. Т. 36. № 5. С. 804.
15. Ветров С.И., Спицын А.В., Шуваев Д.А., Янченков С.В. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. №5. С. 454.
16. Ando A., Hagiwara T., Komagome T., Hattori K., Inutake M. // Plasma Fusion Res. 2008. V. 3. P. S1018.
<http://dx.doi.org/10.1585/pfr.3.S1018>
17. Mazouffre S., Kulaev V., Perez Luna J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2009. V. 18. P. 034022.
<http://dx.doi.org/10.1088/0963-0252/18/3/034022>
18. Biloiu C., Sun X., Choueiri E., Doss F., Scime E., Heard J., Spector R., Ventura D. // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. V. 14. P. 766.
<http://dx.doi.org/10.1088/0963-0252/14/4/016>