

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

Отделение физики плазмы, атомной физики и астрономии, лаборатория
физики высокотемпературной плазмы

На правах рукописи

Горяинов Валерий Юрьевич

**РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ И ЕГО
ПРИМЕНЕНИЕ НА СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Направление подготовки 03.06.01 – физика и астрономия

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в лаборатории высокотемпературной плазмы отделения физики плазмы, атомной физики и астрономии (ОФПАФА) ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Научный руководитель **Воронин Александр Васильевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН

Рецензенты **Кузнецов Виктор Иосифович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заместитель руководителя отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН

Позняк Игорь Михайлович, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории плазмотоники, Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)

Защита состоится «23» июня 2022 г. на открытом заседании государственной экзаменационной комиссии Государственной итоговой аттестации в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26. Телефон ученого секретаря +7 (812) 297-2245.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Научно-квалификационная работа (НКР) посвящена развитию и улучшению работы коаксиального плазменного ускорителя, увеличению энергетических параметров струи, таких как скорость, плотность, давление, направленная кинетическая энергия. Рассматривается возможность развития плазменного рельсотрона, в частности, увеличения энергетических параметров струи за счет увеличения внешнего магнитного поля в межэлектродном зазоре дополнительными проводниками. Особое внимание уделяется требованию низкого содержания примесей в плазменной струе.

В научно-квалификационной работе рассматриваются различные варианты использования плазменной струи ускорителя. Эффективность подачи топлива обеспечивается за счет сильной зависимости термоядерной мощности от плотности плазмы $P_{\text{fusion}} \sim n^2$ (Wesson J. Tokamaks / Wesson J. – Oxford: Oxford science publication, 2004. P. 8–9 - 749 с). Существуют различные способы импульсной подачи вещества в термоядерные устройства: центрифуги, пневматические пушки (Combs S.K. Pellet injection technology / Combs S.K. / Rev. Sci. Instrum. - 1993. - Vol. 64. N 7. - P. 1679–1698; Drobyshevsky E.M. Railgun launch of small bodies / Drobyshevsky E.M., Zhukov B.G., Sakharov V.A. / IEEE. Trans. Magn. – 1995 - Vol. 31. N 1. - P. 299–302), КСПУ (Morozov A.I. Steady-state plasma accelerators and their possible applications in thermonuclear research / Morozov A.I. / Nucl. Fusion. Special suppl. – 1969 - P. 111), эрозионный источник Бостика (Bostick W.H. Experimental Study of Ionized Matter Projected Across a Magnetic Field / Bostick W.H. / Phys. Rev – 1956 – 104 - 292-99), компактные торы (Perkins L.J. Deep penetration fuelling of reactor-grade tokamak plasmas with accelerated compact toroids / Perkins L.J., Ho S.K., Hammer J.H. / Nucl. Fusion. - 1988. - Vol. 28. N 8. - P. 1365–1378), разряд в капиллярных каналах (Эндер А.Я. О режимах истечения плазменной струи капиллярного разряда с испаряющейся стенкой / Эндер А.Я., Кузнецов В.И., Колышкин И.Н. / Журнал технической физики –

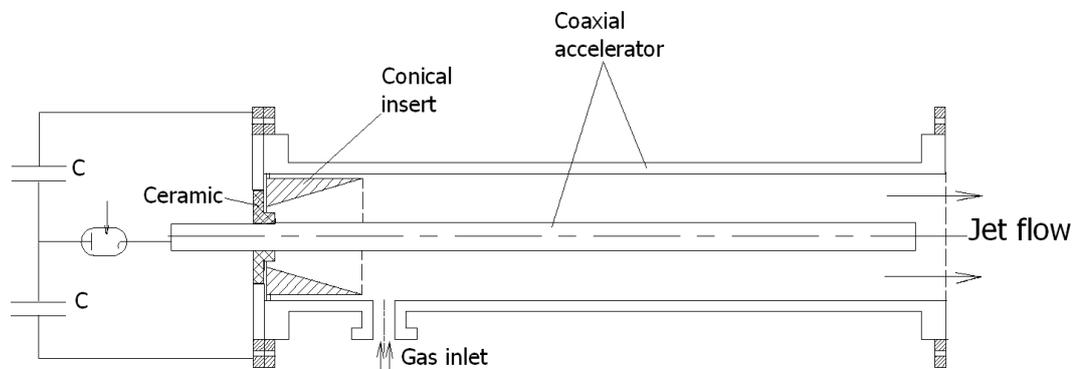
2015 - том 85, вып. 11 - с. 147-151), устройства с плазменным фокусом (Vasiljeva R.P., Pergament M.I., Yaroslavsky A.I. / 3rd International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Novosibirsk (IAEA, Vienna, 1969) - Vol. II - p. 39; Filippov N.V. Dense, High-Temperature Plasma in a Non-cylindrical Z-pinch Compression / Filippov N.V., Filippova T.I., Vinogradov V.P. / Nucl. Fus. Suppl. – 1962 – vol. 2 - p. 577). Но их практическому использованию на токамаках препятствует наличие большого количества примесей, возникающих вследствие эрозии электродов и недостаточной кинетической энергии инжектируемого вещества. В работе представлен ряд исследований и выводов, направленных, прежде всего, на увеличение направленной кинетической энергии струи, позволяющие использовать плазменные ускорители на токамаке с тороидальным магнитным полем до 1 Тл, представлены разработанные плазменные источники с улучшенными характеристиками, а также новые методы измерения параметров струи.

Объектом исследования данной работы является плазменный источник конструкции типа пушки Маршалла (Marshall J. Performance of a Hydromagnetic Plasma Gun / Marshall J. / Phys. Fluids – 1960 - Vol. 3 - P. 134–135), имеющий коаксиальную геометрию электродов (см. рис. 1.1а). У начала ускорителя в зазоре между электродами, находящимися под напряжением, подводится рабочий газ, после чего формируется плазменный разряд. Образующаяся плазма формирует проводящую среду, по центральному электроду и по плазме начинает течь ток. Плазма за счет силы Ампера $F_A = [j \times H]/c$ движется вдоль центрального электрода от области формирования разряда. Коаксиальная конфигурация представляет собой систему из цилиндрического и центрального электродов различной полярности. Плазменный ускоритель, разработанный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, имеет такие параметры энергетике и струи, как представлены в таблице 1 и рисунке 1б. В ходе научной работы разработан быстродействующий компактный газовый

клапан электродинамического типа, который позволял формировать плотное облако газа и не образовывал «хвост» примесей, как это было в предыдущих используемых методах газонапуска. Кроме того, появлялась возможность проводить исследования на различных рабочих газах. Характерные измеренные импульсы тока и напряжения при указанных в таблице 1 параметрах цепи для водородной плазмы, представлены на рисунке 1b. Внешний вид ускорителя и характерный вид струи, представлены на рисунках 1c и 1d. Более подробное описание и развитие рассматриваемого плазменного источника представлено в публикациях (Voronin A.V. A titanium hydride gun for plasma injection into the T2-reversed field pinch device / Voronin A.V., Hellblom K.G. / Plasma Phys. Contr. Fusion – 1999 - Vol. 41 - P. 293–302; Воронин А.В. Исследование коаксиального ускорителя плазменной струи / Воронин А.В., Горяинов В.Ю., Гусев В.К. / ЖТФ – 2020 - Т 90 Вып 6 - С. 1028-34; A.V. Voronin, et. al. / Two stage plasma gun as the fuelling tool of Globus-M tokamak / et al 35th EPS Conference on Plasma Phys. Hersonissos, 9 - 13 June 2008 ECA - Vol. 32D - P-2.104).

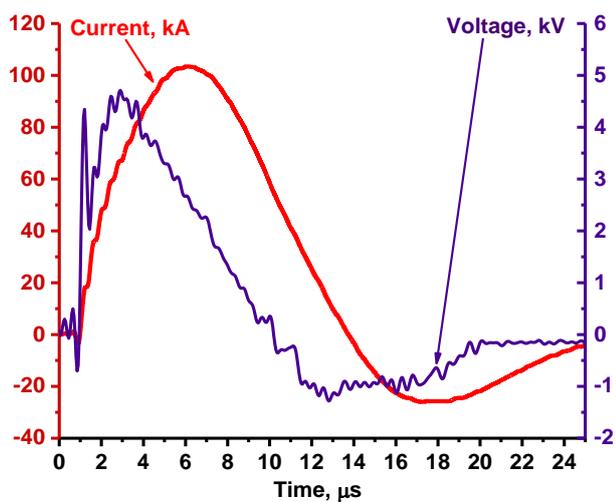
Табл. 1. Технические параметры плазменного ускорителя.

Емкость, мкФ	160
Макс. напряжение, кВ	5
Макс. ток, кА	120
Длительность импульса (первый полупериод), мкс	13-15
Длина центрального / внешнего электрода, мм	220
Диаметр центрального / внешнего электрода, мм	10 / 46 (+4)
Клапан	
Остаточное давление над клапаном, атм	1-3
Время открытого состояния, мкс	400-600
Задержка между запуском клапана и разряда, мкс	350-400
Параметры плазменной струи	
Электронная температура, эВ	0.5-5



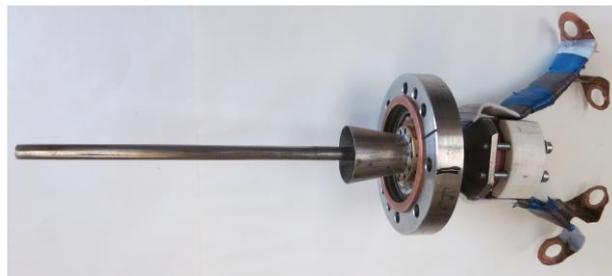
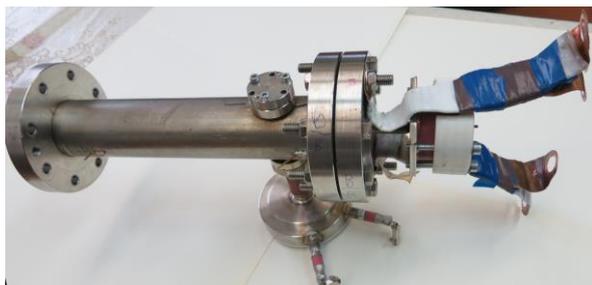
a

Рис. 1а. Схема коаксиального ускорителя плазмы.



b

Рис. 1б. Параметры разряда при емкости конденсаторов 160 мкФ.



c

б

Рис. 1с. Внешний вид коаксиального ускорителя (слева) и центрального электрода с конической вставкой (справа).

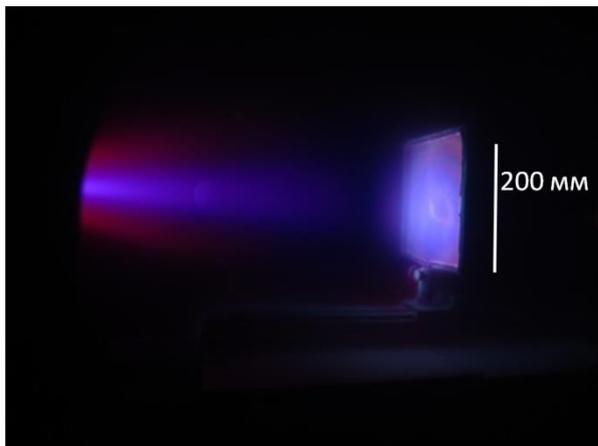


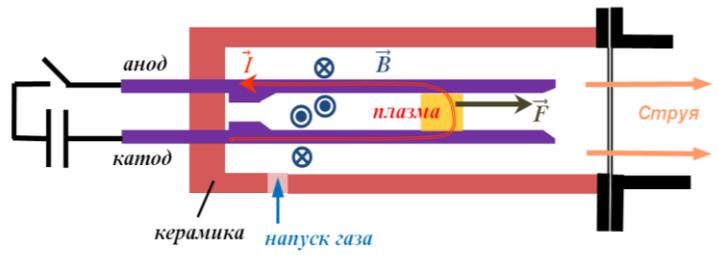
Рис. 1д. Фотография плазменной струи коаксиального ускорителя в вакуумной камере.

d

В качестве сравнения с плазмой коаксиального ускорителя рассматривался и рельсовый ускоритель плазмы, впервые представленный в работе (Goryaionov V.Yu. Investigation of plasma jet sources with high kinetic energy / Goryaionov V.Yu., Voronin A.V., Gusev V.K., Novokhatsky A.N., Poniaev S.A. / *“PhysicA.SPb/2019” J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019 – vol. 1400 (7) - 077020). Плазменный рельсотрон работает по принципу плазменной перемишки, где в качестве ускоряющего тела служит плазма, создаваемая после напуска рабочего газа в камеру и его пробоя после подачи напряжения между электродами. Рельсовый ускоритель имел различные модификации и дополнения, с помощью которых проверялись и испытывались механизмы ускорения, недоступные на коаксиальном ускорителе из-за особенности геометрии электродов. Кроме того, рассматривалось влияние материала стенки камеры рельсотрона на ускорение струи и наличия в ней примесей, которую было легче заменять. В качестве примера на рисунке 2 представлен внешний вид и внутренняя схема одного из разработанных плазменных рельсотронов.



а



б

Рис. 2. Внешний вид (а) и схема (б) плазменного рельсотрона. Цифрами обозначены: 1 – вакуумная камера экспериментального стенда, 2 – газовый клапан, 3 – керамическая камера рельсового ускорителя, 4 – дополнительные внешние проводники.

Большинство испытаний и измерений плазменных источников и их параметров проводилось на экспериментальном стенде плазменного ускорителя, расположенном в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Стенд представлял собой вакуумную камеру объемом 2.5 м^3 с затвором, через который можно было присоединять различные варианты плазменных источников без полной откачки камеры, набор диагностик. Во время эксперимента остаточное давление в камере составляло 10^{-5} Тор.

Предметом исследования является возможность увеличения направленной кинетической энергии струи в ускорителе. Положительный результат в этом исследовании позволит использовать плазменный ускоритель как инжектор частиц – вещества для подпитки термоядерного реактора во время разряда, а также для инициирования разряда в токамаке,

испытании плазменных нагрузок на материалы первой стенки. Как показали исследования (Gusev V.K. Overview of results obtained at the Globus-M spherical tokamak / Gusev V.K., et. al. / Nucl. Fusion – 2009 - Vol. 49. N 10 - P. 104021), в том числе теоретические (Rozhansky V. Penetration of supersonic gas jets into a tokamak / Rozhansky V., Senichenkov I., Veselova I., Morozov D., Schneider R. / Nucl. Fusion – 2006 - Vol. 46. N 2 - P. 367–382), взаимодействие струи ускорителя с магнитным полем токамака негативно влияет на проникновение частиц в центральную область.

Целью исследования является разработка плазменного источника с энергетическими параметрами струи (плотностью $\sim 10^{22} \text{ м}^{-3}$, давлением до 10 МПа, направленной скоростью выше 100-150 км/с, с незначительным содержанием примесей), необходимыми для использования на модернизированном токамаке Глобус-М2 с тороидальным магнитным полем до 1 Тл. Изучение свойств источника плазмы и струи. Предполагается, что плазменная струя ускорителя сможет выполнять задачи, связанные с подпиткой топливом плазмы токамака во время разряда, а также в инициировании разряда на старте. Увеличение энергетических параметров струи позволит плазме ускорителя проникать в центральную область токамака с тороидальным магнитным полем до 1 Тл.

Задачи, поставленные в ходе научно-исследовательской работы:

- Провести исследование параметров ускорителя и получаемой на выходе струи. Выявить условия генерации плазменной струи с наибольшим выходом направленной кинетической энергии. Определить зависимости плотности кинетической энергии и скорости ионизационного фронта от параметров цепи, тока, подаваемого напряжения, длительности импульса, рода газа, геометрии и материала электродов, и др. Провести необходимые для этого измерения.

- Разработать методики и диагностики для получения параметров разряда и струи такие как напряжение на разряде, скорость движения, давление, плотность кинетической энергии струи, угол наклона фронта токовой перемычки.
- Изучить свойства струи, ее вид на выходе из ускорителя. Рассмотреть особенности возникновения и развития разряда в ускорительном канале. Данное исследование позволит лучше понимать механизм ускорения струи, что, в свою очередь, поможет в разработке более эффективного ускорителя.
- Разработка плазменного источника с заявленными в целях исследования требованиями. Предоставление результатов об испытании и использовании ускорителя на установках с магнитным удержанием плазмы, прежде всего, токамаке Глобус-М2.

Материалами исследования стали публикации в области плазменных ускорителей, двигателей Холла, плазменного фокуса, инжекции частиц в плазму токамака, компактных торов, compact helicity injection CHI (Raman R. Solenoid-free plasma start-up in spherical tokamaks / Raman R., Shevchenko V.F. / Plasma Phys. Control. Fusion – 2014 – vol. 56 - 103001 367), и др., экспериментальные результаты, полученные на стенде, токамаках Глобус-М2 и КТМ, данные сопутствующих диагностик, через которые и производилось **документирование** материалов.

Теоретическая база и методология исследования. Публикации, посвященные работе плазменного ускорителя рассматриваемого типа, направлены, прежде всего, на понимание движения токового слоя в ускорительном канале. Общей теории на проблему движения плазмы в ускорительном канале не существует. Примечательны в этом плане статьи Л.А. Арцимовича, П.М. Колесникова, А.А. Калмыкова, Ф. Визерспуна, и др. (Арцимович Л. Электродинамическое ускорение сгустков плазмы /

Арцимович Л., Лукьянов С., Подгорный И., Чуватин С. / ЖЭТФ – 1958 - Т. 33 - С. 3; Witherspoon F.D. A contoured gap coaxial plasma gun with injected plasma armature / Witherspoon F.D., Case A., Messer S.J., Bomgardner R., Phillips M.W., Brockington S., Elton R. / Rev. Sci. Instrum. – 2009 – vol. 80 - 083506).

Арцимович использует т.н. модель «снегоочистителя», в которой масса ускоряющегося сгустка нарастает со временем, напряжение на накопителе мало меняется. Колесников рассматривает плазму как твердое проводящее тело с неизменной массой от времени, «пулей», с сильно изменяющимся напряжением накопителя (Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы / Колесников П.М. - 1971 – М: Атомиздат - с. 213). Моделирование процессов в ускорительном канале также использовалось в представлении, в котором не развиваются колебания. Однако проводимые неоднократно опыты с рассматриваемым здесь ускорителем плазмы указывали на наличие колебаний в выходящей массе (A.V. Voronin, et. al. / Two stage plasma gun as the fuelling tool of Globus-M tokamak / et al 35th EPS Conference on Plasma Phys. Hersonissos, 9 - 13 June 2008 ECA - Vol. 32D - P-2.104). В этом плане наиболее близкой моделью теоретического описания движения тока в канале рассматриваемого здесь ускорителя, является модель, представленная Н.А. Хижняком и А.А. Калмыковым, в которой учтено влияние поляризации плазменного сгустка, и сделано предположение о соответствии распределения электронов по объему распределению потенциала электрического поля в сгустке (Хижняк Н.А. Динамика токового слоя и ускорение плазмы в электродинамическом ускорителе плазмы / Хижняк Н.А., Калмыков А.А. – 1966 – ЖТФ - т. 36, вып. 9 - с. 1608-21). Кроме того, выведенный критерий появления колебаний плотности в канале между альфвеновской скоростью v_A и скоростью фронта токового слоя v_0

$$v_A > \frac{1}{2\sqrt{2}} v_0 \quad (1)$$

хорошо выполняется для исследовавшегося образца ускорителя. На рисунке 3 показана фотография струи, сделанная электронно-оптической камерой, установленной в стрик-режиме (на оси абсцисс отложено время, на оси ординат – расстояние вдоль движения сгустка), на которой отчетливо видна периодическая структура свечения струи.

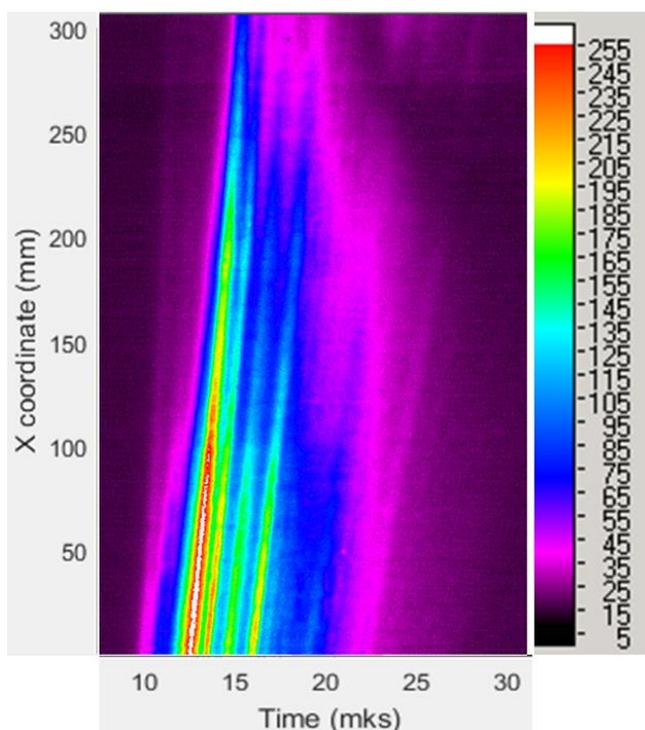


Рис. 3. Фотография выходящей плазменной струи коаксиального ускорителя в вакуумной камере, снятая на ЭО камеру в стрик-режиме, с наблюдаемыми характерными периодическими всплесками излучения.

В научно-квалификационной работе активнее всего используется диагностический подход к изучаемому материалу. В ходе проведения научной работы был разработан ряд недорогих и доступных методов измерения параметров разряда и плазмы. Все диагностики перед использованием калибруются и сравниваются с аналогами, если такие имеются. После сбора данных эксперимента результаты объединяются и сравниваются с результатами, полученными при ранее заданных параметрах ускорителя или цепи питания при прочих равных условиях. Затем проводятся анализ и оценки. Нередко для измерения одной величины используются разные диагностики, как, например, измерение скорости струи. Предварительно перед экспериментом могут проводиться расчеты с помощью дополнительных пакетов или программ, например, для расчета конфигурации магнитных полей в выбранной геометрии электродов.

Актуальность научно-квалификационной работы состоит в том, что плазменные ускорители имеют широкое применение в ряде областей науки: для задач УТС, плазменные двигатели для спутников, испытание нагрузок на материалы, экспериментальное моделирование явлений в космосе и вблизи Солнца (Viktorov M. The dynamics of supersonic plasma flow interaction with the magnetic arch / Viktorov M., Golubev S., Vodopyanov A. / Plasma Phys. Control. Fusion – 2019 – vol. 61 - 035001).

Создание плазменного источника с плотной чистой (свободной от примесей) струей и высокой энергией позволит эффективнее его использовать на установках с магнитным удержанием плазмы, а также расширить область применения таких устройств, так как потребность в высокоэнергетичных струях огромная. Среди последних проектов в мире, связанных с применением плазменных ускорителей, можно отметить создание плазменного слоя из встречных струй вокруг сжимаемой мишени для инерциального удержания и синтеза (Yates K.C. Experimental characterization of a section of a spherically imploding plasma liner formed by merging hypersonic plasma jets / Yates K.C., Langendorf S.J., Hsu S.C., Dunn J.P., Gilmore M., Brockington S., Case A., Cruz E., Witherspoon F.D., Thio Y.C.F., Cassibry J.T., Schillo K. – 2017 - arXiv:2002.03006v1).

Научная новизна научно-квалификационной работы состоит в:

- оптимизации и улучшении работы коаксиального ускорителя плазмы, существенно была улучшена стабильность работы ускорителя и воспроизводимость выстрелов. Такое улучшение связано с разработкой и созданием быстродействующего газового клапана и размещении в торце центрального электрода постоянного магнита.

- увеличении направленной кинетической энергии струи в коаксиальном ускорителе благодаря изменениям в геометрии электродов; увеличении направленной скорости струи.
- создании, разработке и исследовании рельсового ускорителя плазмы, сравнении с работой коаксиального ускорителя.
- разработке недорогих и доступных диагностик и методик для измерения энергетических параметров разряда и струи ускорителя. В-частности, в научно-квалификационной работе представлены методы измерения скорости струи по задержке между сигналами с фотоприемника, направляемого на мишень и тока разряда, а также метод измерения давления струи с помощью пьезодатчика и др.
- выявлении ряда закономерностей и ограничений на дальнейшее увеличение скорости струи, влияние сопротивлений в цепи питания, материалов электродов на скорость и энергию струи.
- использовании разработанного ускорителя на токамаках Глобус-М2 и КТМ с тороидальными магнитными полями 0.7 и 0.9 Тл, соответственно, с целью инициирования разряда.
- анализе поэтапного развития разряда внутри ускорительного канала, начиная с 40 нс после момента нарастания тока. Впервые получены изображения структуры выходящей струи, для разного рода газа. Построена эволюция выходящей струи из полученных изображений.

Теоретическое и прикладное значение. Разработанные в ходе научно-исследовательской работы диагностики в настоящее время активно используются с момента их создания на экспериментальном стенде ускорителя. С их помощью удастся проводить измерения основных параметров струи: скорость, давление, плотность энергии, и сравнивать их с другими вариантами плазменных источников. Выявленные закономерности

по ограничению роста скорости струи от тока, зависимости скорости от параметров цепи питания и материала электродов используются сейчас для продолжения оптимизации работы ускорителя. Полученные видеокadres формирования разряда в укорительном канале, эволюции струи на выходе для различных газов помогут дальнейшим исследованиям, направленных на понимание механизмов ускорения плазмы. Инициирование и формирование разряда с помощью ускорителя в токамаке с большим тороидальным магнитным полем и затрудненными условиями для пробоя позволяет стабильно создавать плазму, снижать напряжение пробоя, уменьшать расход магнитного потока, создаваемого магнитной системой.

Коаксиальный ускоритель, разработанный в ходе научной работы, был успешно апробирован на токамаке Глобус-М2 (большой радиус $R = 0.36$ м, малый радиус $a = 0.24$ м, объем плазмы 0.6 м³, тороидальное магнитное поле в центре $B_{\text{tor}} = 0.7$ Тл) и КТМ ($R = 0.9$ м, $a = 0.45$ м, объемом 5 м³, $B_{\text{tor}} = 0.9$ Тл). Ускоритель использовался на старте разряда для его формирования. Инжектированных частиц струи $\sim 2 \cdot 10^{20}$ (дейтерий) оказывалось достаточно для инициирования разряда на токамаке Глобус-М2. Напряжение на обходе в момент пробоя заметно уменьшалось на обоих токамаках по сравнению с напряжением после индукционного пробоя. На токамаке КТМ с затрудненным индукционным пробоем разряды, инициированные с помощью ускорителя, создавались регулярно. В настоящий момент ускоритель активно используется на данном токамаке.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработка коаксиального ускорителя плазмы, увеличение энергетических параметров струи: скорость, давление, плотность кинетической энергии. Применение ускорителя на модернизированном токамаке Глобус-М2 с увеличенным тороидальным магнитным полем на оси с 0.4 Тл (Глобус-М) до 0.7 Тл и на токамаке КТМ с $B_{\text{tor}} = 0.9$ Тл.

2. Создание и разработка рельсового ускорителя плазмы. Исследование влияния дополнительного магнитного поля в ускорительном канале на энергию струи.
3. Разработка диагностик для определения скорости струи, напряжения в разряде, давления, плотности кинетической энергии струи, скорости и направления угла наклона фронта токового слоя в канале.
4. Обнаружение ограничения скорости струи при достижении током некоторых пороговых значений, которые, в свою очередь, зависят от материала электродов и сорта рабочего газа.

Апробация результатов исследования. Основные положения научно-квалификационной работы прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях и площадках в период с 2019 по 2022 гг: Физика.СПб (г. Санкт-Петербург, Россия), Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (г. Звенигород, Московская обл., Россия), аспирантский семинар FuseNet PhD Event-2020 (г. Падуя, Италия), конференция «СИП: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала-2021» (г. Курчатов, Республика Казахстан). Основное содержание научно-квалификационной работы отражено в 7 публикациях и еще 6 работах, которые являются публикациями в соавторстве. Из 7 статей присутствуют 2 расширенных тезиса конференции Физика.СПб, все включены в WoS. 5 публикаций соответствуют всем требованиям, определенных Министерством образования и науки РФ и ВАК РФ.

Структура научно-квалифицированной работы. Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка. Полный объем научно-квалификационной работы составляет 166 страниц, из них 145 страниц основного текста. Количество рисунков – 68, таблиц – 5. Библиографический список из 115 источников, включая 5 работ соискателя.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы цель работы, задачи, актуальность, теоретико-методологическая основа, научная новизна, представлено прикладное значение. Определены материал, предмет и объект исследования. Также перечислены положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации достигнутых результатов, структуре и объеме работы.

Первая глава с названием «**Обзор методов генерации и ускорения плазмы**» представляет собой литературный обзор существующих источников плазменных струй, их разновидность, и основные области их применения. Подпункты данной главы рассматривают применение некоторых таких устройств: компактные торы (**пункт 1.1**), плазменный фокус (**1.2**), источник Бостика, капиллярные разряды (**1.3** и **1.4**). Основная цель проводимого обзора и описания плазменных источников в подпунктах состоит в том, чтобы показать общие существующие ограничения в их использовании для задач УТС, а также их недостатки перед настоящим объектом исследования – коаксиальным ускорителем (пушкой Маршала). Так, например, общий недостаток всех компактных торов состоит в их крупных габаритах, размещении их в областях сильного магнитного поля в токамаке (СНІ-инжекторы). Эрозионные источники или двигатели Холла на выходе получают плазму с высоким содержанием примесей, относительно низкой плотностью в потоке и расходимостью струи.

Предпоследний подпункт **первой** главы (**1.5**) замыкает обзор на рассмотрении самого ускорителя плазмы, и, таким образом, связывает раздел со следующей главой.

Во **второй главе** «**Коаксиальный ускоритель плазмы**» продолжается проведение литературного обзора по некоторым вопросам, таким как теоретическое объяснение механизма формирования (**2.1**) и ускорения плазмы в межэлектродном промежутке и взаимодействие плазменной струи

ускорителя с магнитным полем и замагниченной плазмой токамака (2.6), и, одновременно с этим, проводилось описание установок, на которых проходили исследования. Обзор по взаимодействию плазмы ускорителя с полем и плазмой токамака проводился, чтобы показать актуальность задачи наращивания направленной кинетической энергии струи ускорителя, давления и скорости для использования на токамаке Глобус-М2 с увеличенным тороидальным магнитным полем до 0.9 Тл по сравнению с Глобус-М (0.5 Тл). Пункт 2.2 описывает экспериментальный стенд плазменного ускорителя, компоненты самого ускорителя, их функцию, расположение диагностик. Описан сценарий запуска плазменного ускорителя. Отдельно рассматривалась диагностика измерения напряжения на разряде с помощью светодиода. В пункте 2.3 рассматривался модифицированный газовый клапан электродинамического типа работы в сравнении с предыдущим методом газогенерации – взрывным, через высвобождение водорода из гранул гидрида титана. Показывалась эффективность его работы. Для этого представлены две разработанные диагностики по измерению открытого состояния клапана за один импульс и скорости расхода газа (производительность) для разных модификаций клапана. Первая диагностика основана на измерениях ионизационной лампы ПМИ-10-2, вторая – на использовании пьезодатчика с двумя непроводящими стрижнями по разную сторону от него. Последняя диагностика хорошо себя показала в том числе для измерения давления струи коаксиального ускорителя. В пункте 2.4 описан рельсовый ускоритель плазмы, изложено применение его в рамках исследования коаксиального ускорителя. В 2.5 приведено краткое описание токамака Глобус-М2 с основными, самыми часто используемыми, диагностками.

Третья глава «Исследование свойств струи» посвящена основным результатам по разработке плазменного источника с увеличенными энергетическими параметрами струи. Все эксперименты проводились на

стенде плазменного ускорителя. Представлены исследования струи рельсового ускорителя плазмы с керамической камерой (3.1), коаксиального ускорителя (3.2). В 3.1 показан эффект увеличения энергии струи после увеличения магнитного поля в зазоре с 3 до 5 Тл. В пункте 3.2 представлена конструкция коаксиального ускорителя плазмы с конической вставкой у основания, которая уменьшала зазор и провоцировала разряд возвращаться к началу. Предложен метод измерения давления с помощью отклоняющегося экрана и тепловизора.

В 3.3 проводились исследования структуры струи, создаваемой коаксиальным ускорителем плазмы для разных газов. С помощью скоростной электронно-оптической камеры обнаружена неоднородная структура струи плазмы. Наблюдалось заметное отличие между характером излучения струй аргона и дейтерия, временем свечения. Длительность свечения соответствовала времени трехчастичной рекомбинации для газа. Проводились исследования формирования и эволюции движения разряда в ускорителе плазмы. Показано, что сначала диффузный разряд инициировался у основания конической вставки. К концу 0.5 мкс разряд выходил на наружную границу вставки, контрагировался, горел между центральным и наружным электродами. Выход разряда из ускорителя наблюдался к началу 3 мкс и сопровождался свечением торца центрального электрода. Сорт рабочего газа не влиял на поведение разряда.

В пункте 3.4 приводятся результаты, в которых скорость струи невозможно увеличить увеличением тока из-за эрозии электродов и примесей. В 3.5 представлена методика определения угла наклона фронта токового слоя с помощью светодиодов, размещенных на поверхности электродов и измеряющих ток по падению напряжения на электроде. Также приводятся результаты по эволюции токового слоя во время разряда.

В 3.6 изложено проведение исследований по увеличению энергии струи за счет увеличения активного и реактивного сопротивлений цепи, внутренней, самого плазменного источника, и внешней, подводящей цепи. Увеличение сопротивления было направлено на увеличение напряжения в разряде U_d для ускорения основной массы создаваемой плазмы механизмом дрейфа $E \times B$. Представлен вариант ускорителя, в котором сужение электродов в области формирования разряда с помощью конусной вставки заменено на внедрение магнитов на конец электродов для препятствия локализации разряда на выходе ускорителя. Представлены экспериментальные исследования по изучению влияния напряжения и длительности разряда на энергию струи. Сравнивалась цепь с емкостью 160 мкФ, периодом импульса 20 мкс, напряжением 5 кВ с цепью с емкостью 12 мкФ, 17 кВ, 5 мкс длительностью периода импульса тока.

Четвертая глава «Использование коаксиального ускорителя плазмы на токамаке. Инициирование разряда в токамаке с помощью плазменной струи ускорителя» состоит из трех пунктов. В первом пункте 4.1 продолжают изучаться свойства струи, отдаленной от мишени через трубку-проставку, длину которой можно было менять. Эксперименты проводились на стенде. По нагреву мишени после облучения плазмой ускорителя оценивалось падение энергии струи от расстояния между ускорителем и мишенью.

В пунктах 4.2 и 4.3 приводятся результаты использования коаксиального плазменного ускорителя на токамаках Глобус-М2 и КТМ с тороидальными магнитными полями на оси 0.7 и 0.9 Тл, соответственно. Цель состояла в инициировании разряда с помощью струи плазменного ускорителя. Представлены результаты успешного использования плазменной струи, в том числе удаленной на расстояние ~ 1.5 м, для инициирования разряда на обеих установках. На токамаке КТМ, в котором индукционный

пробой нейтральным газом был затруднен, с помощью плазменной струи ускорителя стабильно создавался.

В **заключении** подводятся итоги исследования научно-квалификационной работы и формулируются основные выводы из положений, вынесенных на защиту.

**Список работ, опубликованных автором по теме научно-
квалификационной работы**

- [1] Bakharev N.N. Development of the high kinetic energy plasma jet for central fuelling / Bakharev N.N., Bormatov A.A., Gusev V.K., **Goryaionov V.Yu.**, Ibyaminova A.D., Novokhatsky A.N., Ponyaev S.A., Sakharov N.V., Voronin A.V. / *43rd EPS Conference on Plasma Physics* – 2016 - **P2.067**, <http://ocs.ciemat.es/EPS2016PAP/pdf/P2.067.pdf>
- [2] Voronin A.V. Development of source for fuel feeding into central zone of thermonuclear reactor / Voronin A.V., Bakharev N.N., Gusev V.K., Ibyaminova A.D., Novokhatskij A.N., Ponyaev S.A., Sakharov N.V., **Goryainov V.Yu.** / *XLIV International Zvenigorod conference on plasma physics and controlled fusion. Book of abstracts* – 2017 – vol. 49, n 46, 49092760
- [3] **Goryaionov V.Yu.** Investigation of plasma jet sources with high kinetic energy / **Goryaionov V.Yu.**, Voronin A.V., Gusev V.K., Novokhatsky A.N. and Ponyaev S.A. / “*Physica.SPb/2019*” *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019 - **1400** (7) – 077020, doi:10.1088/1742-6596/1400/7/077020
- [4] А.В. Воронин, **В.Ю. Горяинов**, и др. *ЖТФ*, том 89, вып. 7 с. 1021-4 (2019) / A.V. Voronin, **V.Yu. Goryainov**, et. al. Investigation of a Rail Electromagnetic Plasma Jet Source. *Techn. Phys.* **64** 7 962-5 (2019) doi:10.1134/S1063784219070272
- [5] Воронин А.В. Исследование рельсового электромагнитного источника плазменной струи / Воронин А.В., **Горяинов В.Ю.**, Гусев В.К., Новохацкий А.Н., Поняев С.А. / *Журнал технической физики*, - 2019 - том 89, вып. 7 - с. 1021-4 // Voronin A.V. Investigation of a Rail Electromagnetic Plasma Jet Source / Voronin A.V., **Goryainov V.Yu.**, Gusev V.K., Novokhatsky A.N., Ponyaev S.A. / *Technical Physics* – 2019 – vol. 64, 7 - 962-5, doi:10.1134/S1063784219070272

- [6] Воронин А.В. Исследование коаксиального ускорителя плазменной струи / Воронин А.В., **Горяинов В.Ю.**, Гусев В.К. / Журнал технической физики – 2020 - том 90, номер 6 - с. 1028-34 // Voronin A.V. Investigation of a Coaxial Plasma Jet Accelerator / Voronin A.V., **Goryainov V.Yu.**, Gusev V.K. / *Technical Physics* – 2020 – vol. 65, 6 - 987-93, doi:10.21883/JTF.2020.06.49294.372-19
- [7] **Goryainov V.Yu.** Control of tokamak discharge parameters using a plasma jet / **Goryainov V.Yu.**, Voronin A.V., Gusev V.K., Minaev V.B., Novokhatsky A.N., Petrov Yu.V. and Sakharov N.V. / “*Physica.SPb/2020*” *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2020 – vol. 1697 – 012239, doi:10.1088/1742-6596/1697/1/012239
- [8] **Горяинов В.Ю.** Особенности формирования разряда в ускорителе плазмы и структура струи, истекающей в вакуум / **Горяинов В.Ю.**, Викторов М.Е., Водопьянов А.В., Воронин А.В. / *Журнал технической физики* – 2021 - том 91, вып. 2 - с 335-41 // **Goryainov V.Yu.** Peculiarities of the Discharge Formation in a Plasma Accelerator and Structure of a Jet Flowing into Vacuum / **Goryainov V.Yu.**, Viktorov M.E., Vodop’yanov A.V., Voronin A.V. / *Techn. Phys.* – 2021 – vol. 66, n 2 - 325–32
- [9] Воронин А.В. Инициирование разряда в токамаках Глобус-М2 и КТМ с помощью коаксиального ускорителя плазменной струи / Воронин А.В., **Горяинов В.Ю.**, Гусев В.К., Минаев В.Б., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Жилин Е.Г., Чектыбаев Б.Ж., Сарсембаев Е.А., Садыков А.Д., Кусаинов А.Т. / *Физика плазмы* – 2021 - том 47, № 8 - с. 675-683 // Voronin A.V. Discharge initiation in Globus-M2 and KTM tokamaks using coaxial plasma jet accelerator / Voronin A.V., Goryainov V.Yu., Gusev V.K., Minaev V.B., Novokhatsky A.N., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Zhilin E.G., Chektybaev B., Sarsembaev E.A., Sadykov A.D., Kusainov A.T. / *Plasma Phys. Rep.* – 2021 – vol. 47 no 8 - 763-71, doi:10.1134/S1063780X21080109

[10] **Goryainov V.Yu.** About Limitation for the Plasma Motion Velocity in Electrodynamic Accelerator / Goryainov V.Yu. and Voronin A.V. / *Plasma Phys. Rep.* – 2022 – vol. 48, no 3 – pp. 289-293

[11] Minaev V The results of the first experimental campaign on the Globus-M2 spherical tokamak / Minaev V, Gusev V, Petrov Yu, Sakharov N, Varfolomeev V, Bakharev N, Balachenkov I, Bulanin V, Chernyshev F, Dyachenko V, Kurskiev G, Shchegolev P, Telnova A, Kavin A, Khromov N, Kiselev E, Krikunov S, Konovalov A, Korepanov P, Melnik A, Miroshnikov I, Novokhatsky A, Patrov M, Petrov A, Ponomarenko A, Shikhovtsev I, Shulyatyev K, Tkachenko E, Tokarev V, Tolstyakov S, Tukhmeneva E, **Goryainov V**, Iliasova M, Khilkevitch E, Nesenevich V, Shevelev A, Skrekel O, Voronin A, Yashin A, Zhilin E, Zhiltsov N. / *47th EPS Conference on Plasma Physics, 21-25 June 2021* – 2021 - **P5.1044**

[12] Petrov Yu. Overview of Globus-M2 spherical tokamak results at the enhanced values of magnetic field and plasma current / Petrov Yu., Gusev V., Sakharov N., Minaev V., Varfolomeev V., Dyachenko V., Balachenkov I., Bakharev N., Bondarchuk E., Bulanin V., Chernyshev F., Iliasova M., Kavin A., Khilkevich E., Khromov N., Kiselev E., Konovalov A., Kornev, V., Krikunov S., Kurskiev G., Melnik A., Miroshnikov I., Novokhatsky A., Zhiltsov N., Patrov M., Petrov A., Ponomarenko A., Shulyatiev K., Shchegolev P., Shevelev A., Skrekel O., Telnova A., Tukhmeneva E., Tokarev V., Tolstyakov S., Voronin A., Yashin A., Bagryansky P., Zhilin E., **Goryainov V.** / *Nucl. Fus – 2021* - <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac27c7>

[13] Kurskiev G. Energy confinement in the spherical tokamak Globus-M2 with a toroidal magnetic field reaching 0.8 T / Kurskiev G., Gusev V., Sakharov N., Petrov Yu., Bakharev N., Balachenkov I., Bazhenov A., Chernyshev F., Khromov N., Kiselev E., Krikunov S., Minaev V., Miroshnikov I., Novokhatsky A., Zhiltsov N., Mukhin E., Patrov M., Shulyatiev K., Shchegolev P., Skrekel O., Telnova A., Tkachenko E., Tukhmeneva E., Tokarev V., Tolstyakov S., Varfolomeev V.,

Voronin A., **Goryainov V.**, Bulanin V., Petrov A., Ponomarenko A., Yashin A.,
Kavin A., Zhilin E., Solovey V. *Nucl. Fus* – 2021 -
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4326/ac38c9>

Участие в конференциях

- [1] **В.Ю. Горяинов**, А.В. Воронин, В.К. Гусев, А.Н. Новохацкий, С.А. Поняев. Исследование источников плазменной струи с большой кинетической энергией. *Международная Конференция «Физика.СПб/2019» 22-24 октября 2019 г., Санкт-Петербург, Россия*
- [2] **В.Ю. Горяинов**, А.В. Воронин, В.К. Гусев, В.Б. Минаев, А.Н. Новохацкий, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров. Управление параметрами разряда токамака с помощью плазменной струи. *Международная Конференция «Физика.СПб/2020» 19-23 октября 2019 г., Санкт-Петербург, Россия*
- [3] **V.Yu. Goryainov** and A.V. Voronin. Discharge formation in tokamak Globus-M2 using plasma accelerator jet injection (Формирование разряда на токамаке Глобус-М2 с помощью инъекции струи плазменного ускорителя). *International Conference of Plasma Physics and Controlled Fusion FuseNet PhD Event-2020 (Pecha Kucha). г. Санкт-Петербург (г. Падуя), 23 ноября 2020 г.*
- [4] **В.Ю. Горяинов**, М.Е. Викторов, А.В. Водопьянов, А.В. Воронин. Исследование структуры струи, создаваемой коаксиальным ускорителем плазмы. *XLVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС – 2020. г. Звенигород Московской обл. 16 — 20 марта 2020 года*
- [5] **В.Ю. Горяинов** и А.В. Воронин. Об ограничении скорости движения плазмы в электродинамическом ускорителе. *IX Международная конференция «СИП: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала-2021», 07-09 сентября 2021 г., г. Курчатов, Республика Казахстан, с 83, <https://static.nnc.kz/sts/abstracts.pdf>*
- [6] **В.Ю. Горяинов** и А.В. Воронин. Об ограничении скорости движения плазмы в электродинамическом ускорителе. *Международная Конференция «Физика.СПб/2021» 19-22 октября 2021 г., Санкт-Петербург, Россия*
- [7] **Горяинов В.Ю.**, Воронин А.В., Исследование движения токового слоя в коаксиальном ускорителе плазмы. *XLIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС – 14-18 марта 2022 г. гор. Звенигород Московской обл., Россия*