УДК 533.9.03

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ПЛАЗМЫ И РАЗРЯДА КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ С СОБСТВЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Н.С. Климов¹, Д.В. Коваленко¹, В.Л. Подковыров¹, Д.М. Кочнев¹, А.Д. Ярошевская¹,
Р.В. Урлова¹, А.Н. Козлов², В.С. Коновалов²

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Троицк, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, Москва, Россия

Квазистационарные сильноточные плазменные ускорители (КСПУ) активно используются в настоящее время для испытания обращённых к плазме компонентов термоядерного реактора (ТЯР) токамака ИТЭР и исследования эрозии материалов при воздействии концентрированных потоков энергии. В качестве перспективных направлений применения КСПУ рассматриваются также прикладные задачи, связанные с созданием технологий плазменной обработки материалов и разработкой мощных электрореактивных плазменных двигателей. Решение поставленных задач предполагает эксплуатацию КСПУ в новых режимах работы, что, в свою очередь, требует оптимизации плазменного ускорителя с целью обеспечения определённого диапазона параметров плазменного потока, согласования с источником питания, достижения приемлемого КПД, обеспечения устойчивости. В связи с этим актуальными являются экспериментальные исследования взаимосвязи параметров плазменного потока с характеристиками разряда в ускорителе. Эти исследования являются предметом настоящей работы. В режимах работы КСПУ, представляющих интерес для испытания компонентов ТЯР, исследована эффективность передачи энергии потока плазмы на облучаемую твердотельную мишень, а также эффективность преобразования энергии потока плазмы в излучение. При формировании потоков водородной плазмы длительностью 0,5 мс, с энергосодержанием до 150 кДж продемонстрирована возможность обеспечения КПД ускорителя свыше 80%, а КПД преобразования энергии потока в излучение плазмы до 40%. Полученные экспериментальные данные необходимы для развития нового направления исследований, связанного с введением в КСПУ дополнительного продольного магнитного поля в сочетании с управлением параметрами плазмообразующего газа на входе в ускорительный канал с целью обеспечения устойчивости работы в более широком диапазоне параметров.

Ключевые слова: плазменные ускорители, плазменные потоки, КСПУ, ТЯР, излучение плазмы.

EXPERIMENTAL STUDY OF INTEGRATED CHARACTERISTICS OF PLASMA STREAM AND DISCHARGE OF A QUASI-STATIONARY HIGH-CURRENT PLASMA ACCELERATOR WITH ITS OWN MAGNETIC FIELD

N.S. Klimov¹, D.V. Kovalenko¹, V.L. Podkovyrov¹, D.M. Kochnev¹, A.D. Yaroshevskaya¹,
R.V. Urlova¹, A.N. Kozlov², V.S. Konovalov²

¹SRC «TRINITI», Moscow, Troitsk, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Science, Moscow, Russia

Quasistationary high-current plasma accelerators (QSPAs) are currently being actively used to test plasma-facing components (PFCs) of the ITER tokamak and to study the erosion of materials under intense energy fluxes. As a promising area of application of QSPA, there are also technologies for plasma processing of materials and the development of powerful electric jet plasma engines. These tasks are need to QSPA operation in new modes, which, in turn, requires optimization of the plasma accelerator for providing the certain range of plasma stream parameters, coordination with the power source for achieve an acceptable efficiency, and ensuring stability. In this connection, experimental studies of the relationship between the parameters of the plasma flux and the discharge characteristics in the accelerator are relevant. These studies are the subject of this work. In the QSPA operation modes for PFCs testing, the efficiency of the transfer of plasma flux energy to target absorbed energy, as well as the efficiency of plasma flux energy conversion into radiation, was investigated. In these modes, for hydrogen plasma flow with duration of 0.5 ms and energy content of up to 150 kJ, it has been demonstrated that the efficiency of the accelerator can be greater than 80%, and the efficiency of converting the energy of the stream into plasma radiation is up to 40%. The obtained experimental data are necessary for the development of a new research direction related to the introduction of an additional longitudinal magnetic field in the QSPA in combination with the control of the parameters of the gas flow at the entrance to the acceleration channel. This research direction is need for development the stability of QSPA operation in a wider range of parameters.

Key words: plasma accelerators, plasma streams, QSPA, fusion reactor, plasma radiation.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-3-52-63

ВВЕДЕНИЕ

Для экспериментального исследования динамики мощных потоков плазмы в магнитном поле требуется создавать мощные потоки плазмы в лабораторных условиях. Этой цели служит класс устройств,

называемых плазменными ускорителями. В течение 1980—1990-х гг. в рамках государственной программы в ряде научных центров под руководством академика А.П. Александрова и профессора А.И. Морозова были созданы лаборатории и разработаны коаксиальные плазменные ускорители (КПУ) различных модификаций, в частности, предложенные А.И. Морозовым квазистационарные сильноточные плазменные ускорители (КСПУ) и магнитоплазменные компрессоры (МПК) [1—5]. В настоящее время экспериментальные исследования КСПУ, МПК и их приложений продолжаются в ГНЦ РФ ТРИНИТИ (г. Троицк, Москва), Институте физики плазмы ННЦ ХФТИ НАН (г. Харьков) и Институте молекулярной и атомной физики НАН (г. Минск) [6—10].

Последние 20 лет деятельность этих лабораторий в основном была ориентирована на использование плазменных ускорителей для решения прикладных задач, в частности, испытания обращённых к плазме материалов термоядерного реактора (ТЯР) на основе токамака [11—19]. В рамках этих исследований в ГНЦ РФ ТРИНИТИ был создан уникальный комплекс плазменных ускорителей. Этот комплекс включает в себя, в частности, два квазистационарных сильноточных плазменных ускорителя (установки КСПУ-Т и КСПУ-Ве) и позволяет проводить изучение поведения всех представляющих интерес для разработки ТЯР материалов при плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в Международном термоядерном реакторе ИТЭР [20—23]. В процессе исследований, кроме прямого плазменного воздействия высокотемпературной плазмы на материалы, удалось также реализовать режим опосредованного облучения, при котором существенная часть энергии плазменного потока в результате его торможения на вспомогательной мишени преобразуется в излучение в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, которое, в свою очередь, производит основное воздействие на материал [24—26]. Применение двух экспериментальных схем облучения материалов на плазменных ускорителях существенно расширяет возможности их использования для исследования взаимодействия плазмы с материалами, поскольку позволяет отделить процессы, специфические для плазменного облучения, от общих процессов, обусловленных тепловым воздействием.

Лабораторные исследования КПУ сопровождаются широкой теоретической поддержкой. Теории аксиально-симметричных течений плазмы посвящены обзоры [2, 27—29] и монографии [1, 3, 30, 31], а также ряд статей [32—34]. Существенная роль в разработке КПУ и понимании происходящих процессов отводится численным моделям. Основы численного моделирования процессов в КПУ были заложены в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН профессором К.В. Брушлинским, под руководством которого сформировалось научное направление по математическому моделированию различных задач плазмодинамики и плазмостатики [28, 31]. Численным исследованиям динамики потоков в ускорителях также посвящён ряд публикаций [35—43].

Согласно проведённым ранее экспериментальным и теоретическим исследованиям одной из проблем создания мощных КПУ является возможное развитие неустойчивостей мощных плазменных потоков в ускорительном канале при определённых условиях [1, 3, 4]. В случае КСПУ в качестве одного из способов преодоления развития неустойчивостей ранее рассматривалось создание двухступенчатых плазменных ускорителей [1, 2]. Двухступенчатая схема предполагает непрерывную подачу плазмы на входе второй ступени или основного канала ускорителя. Для её реализации использовались установки со сложной и громоздкой системой анодных трансформеров [7, 8], эффективность работы которых до настоящего времени не получила должного подтверждения.

Новое направление исследований связано с введением в систему продольного магнитного поля для дополнительного управления потоками и стабилизации возможных неустойчивостей. Наличие продольного поля приводит к вращению плазмы, и предшествующие исследования являются частным случаем в отсутствие вращения. Существует ряд теоретических исследований, включающих результаты численного моделирования, в которых обоснована целесообразность использования продольного магнитного поля для стабилизации течения плазмы в плазменных ускорителях [32, 33]. Согласно данным исследованиям, сочетание продольного магнитного поля с управлением параметрами потока плазмообразующего газа на входе в ускорительный канал позволяет существенным образом повысить эффективность КПУ [35—37, 39, 40]. В то же время детальная экспериментальная проверка результатов теоретических исследований не проводилась. Эксперименты с продольным магнитным полем носили ограниченный характер и касались исследования только интегральных характеристик разряда КПУ [44, 45]. Отсутствие

всесторонней экспериментальной проверки теоретических исследований и недостатков новых экспериментальных данных осложняют разработку мощных плазменных ускорителей. Настоящая работа направлена на решение данной проблемы.

Необходимо отметить, что с увеличением числа задач, решаемых с применением КСПУ, расширяется и диапазон рабочих режимов ускорителя. Расширение режимов происходит преимущественно в область более низких значений разрядного тока и соответственно более слабого собственного магнитного поля. Данные режимы являются менее изученными как экспериментально, так и теоретически, поскольку характеризуются меньшей устойчивостью, более широким спектром сложных физических явлений. Введение дополнительного продольного магнитного поля в качестве дополнительного механизма управления также может повысить устойчивость работы в этих режимах. Для экспериментального исследования этой возможности требуется сначала провести исследования работы КСПУ в данных режимах в отсутствие продольного магнитного поля, что являлось задачей настоящей работы. Основное внимание в работе уделено исследованию интегральных характеристик КСПУ, таких как вольтамперная характеристика разряда, вложенная в разряд энергия, полное энергосодержание потока плазмы, энергия, поглощённая мишенью, и энергия излучения плазмы, возникающего при торможении на твердотельной мишени. Необходимо отметить, что в отличие от ранее выполненных работ в данной работе весь комплекс указанных параметров измерялся в одной экспериментальной схеме на одной экспериментальной установке, что позволило исследовать баланс энергии в широком диапазоне параметров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ДИАГНОСТИКА

Плазменный ускоритель КСПУ-Т. Контроль электротехнических характеристик. Установка КСПУ-Т представляет собой одноступенчатый квазистационарный плазменный ускоритель с собственным магнитным полем (рис. 1). Основными частями ускорителя являются два коаксиальных электрода (1), разделённых изоляторами (2), и электродинамический клапан (3), обеспечивающий подачу рабочего газа в межэлектродный промежуток. Внутренний электрод ускорителя (катод) изготовлен из тугоплавкого сплава ВНДС и имеет специальный профиль. Максимальный диаметр внутреннего электрода 50 мм. Внешний электрод (анод) выполнен в виде набора из 24 медных стержней. Оси стержней параллельны оси внутреннего электрода. Стержни равномерно распределены по окружности диаметром 100 мм и окружены непроницаемым стальным кожухом. Электродная система ускорителя помещена в вакуумную камеру (4). Перед каждым пуском вакуумная камера откачивается до давления $5 \cdot 10^{-5}$ торр, подклапанный объём (5) заполняется рабочим газом до давления несколько атмосфер. При срабатывании электродинамического клапана газ через дросселирующий канал (6) начинает поступать в межэлектродный промежуток. Спустя определённый промежуток времени (время задержки) на электроды ускорителя подаётся напряжение, в результате чего происходят пробой и ионизация газа в межэлектродном зазоре ускорителя. При взаимодействии радиального компонента, возникающего при этом объёмного электрического тока j_r с азимутальным собственным магнитным полем B_ϕ появляется продольная сила $F_z \sim j_r B_\phi$, которая ускоряет плазму. Источник питания ускорителя представляет собой конденсаторную батарею ёмкостью 96 мФ, разделённую на шесть одинаковых секций. Каждая секция коммутируется на нагрузку с помощью отдельного вакуумного разрядника. Изменяя временной интервал между запуском секций, можно варьировать длительность разряда в диапазоне 0,2—1,0 мс, сохраняя при этом ток на определённом уровне. С увеличением длительности происходит увеличение энергосодержания потока плазмы. Другим способом увеличения энергосодер-

Рис. 1. Схема КСПУ-Т: 1 — электроды; 2 — изоляторы; 3 — электродинамический клапан; 4 — вакуумная камера; 5 — подклапанный объём для рабочего газа; 6 — дросселирующий канал

лирующий канал (6) начинает поступать в межэлектродный промежуток. Спустя определённый промежуток времени (время задержки) на электроды ускорителя подаётся напряжение, в результате чего происходят пробой и ионизация газа в межэлектродном зазоре ускорителя. При взаимодействии радиального компонента, возникающего при этом объёмного электрического тока j_r с азимутальным собственным магнитным полем B_ϕ появляется продольная сила $F_z \sim j_r B_\phi$, которая ускоряет плазму. Источник питания ускорителя представляет собой конденсаторную батарею ёмкостью 96 мФ, разделённую на шесть одинаковых секций. Каждая секция коммутируется на нагрузку с помощью отдельного вакуумного разрядника. Изменяя временной интервал между запуском секций, можно варьировать длительность разряда в диапазоне 0,2—1,0 мс, сохраняя при этом ток на определённом уровне. С увеличением длительности происходит увеличение энергосодержания потока плазмы. Другим способом увеличения энергосодер-

жания является увеличение амплитуды разрядного тока при сохранении формы и соответственно длительности импульса.

Основными характеристиками разряда КСПУ являются разрядный ток I_p и напряжение на электродах U_p . Для измерения разрядного тока применялся пояс Роговского с пассивной интегрирующей RC-цепочкой. Измерение напряжения разряда осуществлялось с использованием измерительного трансформатора тока. На основании измерений тока и напряжения определялось активное R_p и индуктивное L_p сопротивление ускорителя, а также энергия Q_p , вложенная в разряд. Энергия, вложенная в разряд, определялась как интеграл произведения разрядного тока и напряжения:

$$Q_p = \int_0^{\Delta t} I_p(t) U_p(t) dt, \quad (1)$$

где Δt — длительность разрядного импульса.

Одной из задач проводимых экспериментов являлось определение баланса энергий при облучении твердотельной мишени потоком плазмы. Эксперименты проводились по схеме, представленной на рис. 2. В этой схеме поток водородной (дейтериевой) плазмы (2), сформированный ускорителем (1), падает нормально на твердотельную плоскую мишень (3), расположенную на пути плазменного потока перпендикулярно его оси. По этой общей схеме проводятся эксперименты по испытанию обращённых к плазме материалов ТЯР.

Рис. 2. Общая схема эксперимента по облучению мишеней и схема используемого диагностического комплекса: 1 — плазменный ускоритель; 2 — поток плазмы; 3 — твердотельная мишень; 4 — источник излучения; 5 — калориметр для измерения энергосодержания потока плазмы; 6 — калориметр для измерения энергии, поглощённой мишенью; 7 — калориметр для измерения энергии излучения

Для определения баланса энергий, кроме энергии Q_p , вложенной в разряд, необходимо измерение полной энергии потока плазмы $Q_{пл}$, а также энергии, поглощённой мишенью Q_m и затраченной на излучение (4) Q_{hv} в результате взаимодействия. Для решения этой задачи использовался комплекс калориметрических диагностик.

Комплекс калориметрических диагностик. С целью определения КПД плазменного ускорителя и исследования баланса энергий при облучении потоком плазмы твердотельных мишеней разработан комплекс калориметрических диагностик, включающий в себя калориметры трёх типов:

- объёмный интегральный калориметр для измерения полной энергии потока плазмы (5);
- плоский многоканальный калориметр с пространственным разрешением для измерения распределения поглощённой энергии по поверхности облучаемой мишени (6);
- калориметр с распределённой системой элементов для измерения энергии излучения плазмы (7).

Для измерения энергосодержания плазменного потока использовался специальный термпарный калориметр, представляющий собой металлический объём в виде усечённого конуса, выполненный из листового металла. Большее основание конуса является открытым, через него поток плазмы попадает

внутри калориметра. Меньшее основание (дно калориметра) закрыто металлическим листом определённой формы. Материал калориметра, толщина стенок и площадь внутренней поверхности калориметра выбраны так, чтобы калориметр поглощал и отводил вглубь материала за счёт теплопроводности максимальный ожидаемый в эксперименте тепловой поток при сохранении температуры внутренней поверхности калориметра в приемлемом диапазоне. В экспериментах использовался калориметр, выполненный из стали толщиной 2 мм, длиной 60 см, с диаметрами оснований 27 и 17 см. Площадь внутренней поверхности такого калориметра составляет 5000 см^2 , что позволяет регистрировать потоки энергией до 300 кДж, длительностью 0,5—1,0 мс.

Плазменный поток при попадании в калориметр во время эксперимента отражается от основания и рассеивается на его боковую поверхность. В контакте с внешней стороной калориметра находились термопары, распределённые по его поверхности заданным образом. По разнице температуры в месте расположения термопары до и непосредственно после пуска плазменного ускорителя определялась плотность энергии, поглощённая материалом в месте расположения термопары. В результате интегрирования данных с термопар по поверхности калориметра определялась полная поглощённая калориметром энергия, соответствующая энергии плазменного потока, выделившейся внутри объёма калориметра. Регистрация сигнала с термопар осуществлялась с развёрткой по времени, для определения энергии использовалось значение в момент времени, превышающий время выравнивания температуры по толщине стенки калориметра (через 1 с). Поскольку толщина стенок калориметра существенно меньше его характерных линейных размеров, то данные в указанный момент времени позволяют определить не только полную энергию, но её распределение по внутренней поверхности калориметра.

Плоский многоканальный калориметр с пространственным разрешением представлял собой квадратную пластину из тугоплавкого материала — молибдена с площадью рабочей поверхности $140 \times 140 \text{ мм}$, превышающей эффективный диаметр плазменного потока (6 см). В пластину встроены измерительные элементы. Измерительный элемент калориметра представлял собой сплошной цилиндр квадратного сечения ($10 \times 10 \text{ мм}$), одно из оснований которого обращено к плазме, другое основание, изолированное, как и боковая поверхность, от плазменного воздействия, находилось в контакте с термопарой. Измерительные элементы калориметра были распределены по поверхности пластины таким образом, чтобы иметь возможность восстанавливать двумерное распределение тепловой нагрузки по поверхности. Плотность поглощённой энергии определялась аналогично объёмному интегральному калориметру.

Калориметр третьего типа состоит из датчиков, аналогичных элементам многоканального калориметра, но встроенных не в приёмную пластину, имитирующую мишень, а размещённых каждый в отдельном изолированном корпусе. Ряд таких датчиков был распределён в вакуумной камере ускорителя. Датчики были ориентированы таким образом, чтобы регистрировать излучение, возникающее при торможении потока плазмы на твердотельной мишени. В результате интегрирования данных со всего набора датчиков определялась полная энергия излучения.

Интегрирование выполнялось в предположении, что слой плазмы вблизи поверхности мишени излучает изотропно в телесный угол 2π , а коэффициент поглощения излучения плазмы поверхностью калориметра близок к единице. Обоснованность данных допущений представлена в ранее проводимых работах, содержащих исследование пространственных и спектральных характеристик источника излучения, возникающего при торможении потока плазмы КСПУ на твердотельной мишени [20, 24—26].

В случае использования в качестве мишени плоского многоканального калориметра с пространственным разрешением в одном эксперименте определяли две величины: полную энергию излучения и энергию, поглощённую мишенью. Для определения полной энергии потока плазмы твердотельная мишень удалялась из камеры, чтобы не создавать препятствие на входе в объёмный интегральный калориметр.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Вольтамперная характеристика (ВАХ) разряда и режимы работы. Одной из ключевых характеристик разряда плазменного ускорителя является ВАХ разряда. В исследованиях, проведённых ранее,

ВАХ разряда КСПУ измерялись в диапазоне токов, соответствующих достаточно сильному собственному магнитному полю ускорителя. В настоящей работе ВАХ разряда была намеренно зарегистрирована в существенно более широком диапазоне разрядных токов 10—160 кА с целью изучить изменения, происходящие в разряде при выходе на ускорительный режим. Характерная вольтамперная характеристика разряда ускорителя, полученная в эксперименте при работе на водороде с расходом газа $dm/dt = 0,02$ кг/с, представлена на рис. 3.

Согласно измерениям активное сопротивление ускорителя R_p в исследованных режимах варьируется в диапазоне 10—20 мОм, в то время как индуктивность находится на уровне $L_p \sim 100$ нГн, ёмкость $C_p \sim 10$ пФ, время импульса $\Delta t \sim 0,2$ —1,0 мс. При таком соотношении параметров в исследованном диапазоне разрядных токов можно пренебречь индуктивным слагаемым в законе Ома для участка цепи:

$$U_p = I_p R_p + L_p \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

и определять активное сопротивление разряда из отношения напряжения к току. В этом случае более наглядный характер носит зависимость активного сопротивления ускорителя от величины разрядного тока (рис. 4). На данном графике видно, что можно выделить три режима работы ускорителя: первый — со спадающим участком зависимости ($I_p < 50$ кА), второй — область плато ($50 \text{ кА} < I_p < 110$ кА), где активное сопротивление слабо зависит от разрядного тока, и третий — участок кривой, характеризующийся ростом активного сопротивления с разрядным током.

Поведение кривой на рис. 4 может быть объяснено наличием двух слагаемых в выражении для величины электрического поля $\mathbf{E}$ в плазме

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{J}}{\sigma} - \frac{1}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (3)$$

где $\mathbf{J}$ — плотность тока в плазме; σ — проводимость плазмы; $\mathbf{v}$ — скорость потока плазмы; $\mathbf{B}$ — индукция магнитного поля в плазме.

При малых токах собственное магнитное поле в плазме так мало, что можно пренебречь вторым слагаемым по сравнению с первым. Первое слагаемое отвечает за спад напряжения с ростом разрядного тока в результате нагрева плазмы до более высокой температуры и, как следствие, увеличением проводимости. Второе слагаемое отвечает за рост напряжения вместе с разрядных токов вследствие увеличения магнитного поля и скорости плазменного потока. Таким образом, первый режим работы представляет собой режим теплового ускорения плазмы, основная энергия идёт сначала на приращение её внутренней энергии. Третий режим представляет собой ускорительный режим работы, в котором кинетическая энергия плазменного потока существенно превышает внутреннюю тепловую энергию плазмы. Второй режим — переходный, в котором оба слагаемых в правой части формулы (3) играют значимую роль. Характерное значение скорости потока плазмы $v_{пл}$, регистрируемое с использованием времяпролётной методики [24], в ускорительном режиме работы ($110 \text{ кА} < I_p < 150 \text{ кА}$) растёт в диапазоне $(1\text{—}3) \cdot 10^5$ м/с с ростом разрядного тока. Максимальное значение скорости соответствует направленной энергии ионов водорода $E_{H^+} \sim 0,5$ кэВ, при плотности плазмы в свободном потоке на уровне $n_{пл} \sim 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Необходимо отметить, что большинство опубликованных ранее экспериментальных и теоретических результатов по исследованию работы КСПУ относятся преимущественно к третьему режиму

Рис. 3. Вольтамперная характеристика разряда КСПУ при работе на водороде (расход газа $dm/dt = 0,02$ кг/с)

Рис. 4. Зависимость активного сопротивления разряда КСПУ при работе на водороде (расход газа $dm/dt = 0,02$ кг/с)

работы, в то время как в приложениях часто применяется второй режим работы. Сопоставление расчётных и экспериментальных данных осложняется также тем, что на практике в разряде КСПУ всегда есть участок роста и спада разрядного тока, на котором разряд проходит через области, соответствующие второму и первому режимам работы. В ряде случаев эти области вносят существенный вклад в интегральные параметры потока плазмы, затрудняют анализ экспериментальных данных, ограничивают возможности контроля параметров ускорителя и обеспечения необходимых условий эксперимента. Установленные в эксперименте абсолютные значения активного сопротивления ускорителя, в свою очередь, важны с точки зрения согласования ускорителя с системой электропитания для прикладных задач, решаемых с применением КСПУ. Необходимо проведение дальнейших исследований ВАХ КСПУ в широком диапазоне токов, расходов газа и сортов газа, представляющих практический интерес.

Баланс энергий. На основании измерений разрядного тока и напряжения КСПУ, выполненных для построения ВАХ разряда, определялась ключевая характеристика разряда — полная энергия, вложенная в разряд Q_p . Для этого выполнялось интегрирование произведения разрядного тока на напряжение по времени. В целях исследования Q_p варьировалась в эксперименте двумя независимыми способами:

— за счёт увеличения разрядного тока I_p при сохранении формы и соответственно длительности разрядного импульса Δt ;

— за счёт увеличения длительности импульса при сохранении уровня разрядного тока и соответственно вкладываемой в разряд мощности.

При варьировании вложенной в разряд энергии Q_p осуществлялось измерение полной энергии плазменного потока $Q_{пл}$ по описанной методике. Типичные зависимости полной энергии потока плазмы от энергии, вложенной в разряд, представлены на рис. 5.

На графиках видно, что энергия потока плазмы слабо зависит от способа увеличения вложенной в разряд энергии и практически прямо пропорциональна ей. Коэффициент пропорциональности — отношение Q_p к $Q_{пл}$ (тангенс угла наклона кривой) представляет собой коэффициент полезного действия (КПД) ускорителя

$$\eta_{пу} = \frac{Q_{пл}}{Q_p}. \quad (4)$$

Коэффициент $\eta_{пу}$ характеризует эффективность преобразования электрической энергии, подведённой к ускорителю, в энергию плазменного потока. $\eta_{пу}$ не связан с работой системы электропитания ускорителя, а обусловлен физическими процессами, протекающими в плазме ускорительного канала КСПУ. Этот параметр крайне важен с практической точки зрения для сопоставления КСПУ с другими устройствами при решении тех или иных прикладных задач. В исследованных режимах на водороде получено значение КПД ускорителя $\eta_{пу} = (80 \pm 10)\%$, которое в исследованном диапазоне практически не зависит от величины разрядного тока. Полученные высокие значения КПД указывают на существенные преимущества КСПУ по сравнению с другими устройствами генерации мощных стационарных потоков плазмы и на перспективы

Рис. 5. Зависимость энергосодержания потока плазмы $Q_{пл}$ от энергии Q_p , вложенной в разряд: $\blacklozenge$ — $\Delta t = \text{const}$; $\blacksquare$ — $P = \text{const}$

использования КСПУ для решения задач реактивного движения, генерации излучения и других задач.

Одной из таких практических задач, для которых КСПУ активно применяется в настоящее время, является задача по исследованию воздействия высокоэнергетичных потоков на материалы, а также испытание обращённых к плазме материалов термоядерного реактора ИТЭР. С использованием КСПУ осуществляется экспериментальное моделирование плазменно-теплого воздействия на материалы. Ключевыми параметрами этого воздействия являются длительность облучения Δt и плотность энергии, приходящая на поверхность материала. Необходимо отметить, что в случае, когда энергия, затраченная на испарение материала, мала по срав-

нению с поглощённой мишенью энергией Q_m , последняя практически равна энергии, пришедшей на поверхность. В настоящих экспериментах данная величина была измерена с использованием плоского многоканального калориметра и сопоставлена с полной энергией плазменного потока $Q_{пл}$. Результаты сопоставления представлены на рис. 6.

Как видно из полученной зависимости, поглощённая мишенью энергия растёт прямо пропорционально энергии плазменного потока, а доля энергии $\eta_m = Q_m/Q_{пл}$, передаваемая на мишень, практически не зависит от величины разрядного тока. Её значение, полученное в исследованных режимах, находится на относительно невысоком уровне $\eta_m = (15 \pm 5)\%$. Данный результат свидетельствует о низкой эффективности передачи энергии от плазменного потока к твердотельной мишени и указывает на необходимость поиска более оптимальных режимов работы ускорителя для решения задачи. Ожидается, что в этих режимах плотность плазмы будет ниже, а скорость и соответственно энергия ионов выше, что не только повысит эффективность передачи энергии на мишень, но и расширит возможности использования КСПУ для испытания обращённых к плазме компонентов термоядерного реактора токамака [14, 16—23]. Подобная оптимизация является одной из целей дальнейших исследований.

Энергия, которая не передана мишени, может как остаться в обтекающем мишень плазменном потоке, так и быть частично преобразована в энергию излучения Q_{hv} . В ряде прикладных задач, связанных с облучением материалов излучением плазмы, именно эта величина представляет основной интерес. В настоящей работе энергия фотонного излучения контролировалась с применением системы распределённых калориметров и сопоставлялась с полной энергией плазменного потока $Q_{пл}$. В результате экспериментов была получена зависимость, представленная на рис. 7. Согласно измеренным данным эффективность преобразования энергии потока плазмы в излучение $\eta_{hv} = Q_{hv}/Q_{пл}$ составляет 20—30% при энергосодержании потока плазмы в диапазоне 30—120 кДж.

Из сопоставления Q_m , Q_{hv} и $Q_{пл}$ видно, что более 50% энергии остаётся в обтекающем мишень плазменном потоке. Следовательно, для решения задачи генерации излучения также требуется оптимизация режимов работы КСПУ, направленная на увеличение эффективности преобразования η_{hv} . Одна из таких попыток была предпринята в работе [24], где в качестве рабочего газа использовался аргон — газ, характеризующийся высокой излучательной способностью. В этой работе были достигнуты более высокие значения η_{hv} на уровне 50—60%, при этом абсолютные значения энергии излучения Q_{hv} не превышали значения, полученные при работе на водороде и представленные в настоящей работе. Обусловлено это тем, что для аргона при тех же значениях разрядного тока наблюдаются более низкие значения напряжения и соответственно полной энергии в потоке плазмы, чем для водорода. Данный результат указывает на необходимость исследования полного баланса энергий при решении задач прикладной оптимизации КСПУ и подтверждает актуальность представленных в настоящей работе исследований.

Рис. 6. Зависимость поглощённой мишенью энергии Q_m от энергосодержания потока плазмы $Q_{пл}$: $\blacklozenge$ — $\Delta t = \text{const}$; $\blacksquare$ — $P = \text{const}$

Рис. 7. Зависимость энергии излучения плазмы Q_{hv} от энергосодержания потока плазмы $Q_{пл}$: $\blacklozenge$ — $\Delta t = \text{const}$; $\blacksquare$ — $P = \text{const}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В режимах работы КСПУ, выбранных для испытания обращённых к плазме материалов международного термоядерного реактора ИТЭР, в широком диапазоне разрядных токов от 15 до 150 кА проведена регистрация ВАХ разряда при работе на водороде расходом газа на уровне 0,02 кг/с. Установлено, что в данных режимах КСПУ представляет собой активную нагрузку, характеризующуюся сопротивлением в диапазоне 10—20 мОм. Показано, что для описания КСПУ целесообразно использовать зависимость активного сопротивления от разрядного тока $R(I)$, характеризующуюся большей наглядностью по сравнению с ВАХ. На основе анализа экспериментальных данных выявлены три режима работы КСПУ, соответствующие различным участкам этой зависимости: тепловой — сопротивление падает с ростом тока; смешанный — сопротивление слабо зависит от тока; ускорительный — сопротивление растёт вместе с током. Соответственно перегиб на ВАХ разряда обусловлен переходом из теплового режима работы в ускорительный и не связан с явлением кризиса тока, ожидаемым при существенно больших токах в ускорительном режиме работы. Предложено качественное объяснение данного эффекта, основанное на анализе соотношения между такими величинами, как J/σ и $[vB]/c$, определяющими величину электрического поля в канале плазменного ускорителя. В соответствии с этим анализом в тепловом и смешанном режимах работы слагаемое J/σ сопоставимо по величине с $[vB]/c$ и существенным образом влияет на работу ускорителя, что должно учитываться при оптимизации КСПУ для различных приложений.

В диапазоне разрядных токов в области смешанного и ускорительного режимов работы впервые в рамках одной экспериментальной схемы выполнен комплекс измерений следующих величин: вложенная в разряд энергия Q_p , полная энергия потока плазмы $Q_{пл}$, поглощённая мишенью энергия Q_m , энергия излучения Q_{hv} . Данный комплекс измерений позволил провести исследование баланса энергий и эффективности работы КСПУ при его использовании для решения прикладных задач.

В результате исследования на водороде продемонстрирован КПД ускорителя на уровне $\eta_{пу} = (80 \pm 10)\%$, который практически не зависит от величины разрядного тока. Полученные высокие значения КПД указывают на существенные преимущества КСПУ по сравнению с другими устройствами генерации мощных стационарных потоков плазмы и на перспективы использования КСПУ для решения прикладных задач, в частности, задач реактивного движения.

Коэффициент эффективности передачи энергии от потока плазмы к облучаемой мишени, в свою очередь, характеризуется низкими значениями $\eta_m = (15 \pm 5)\%$, которые также не зависят от величины разрядного тока. Данный результат указывает на необходимость оптимизации работы КСПУ для решения задач облучения материалов, направленной на повышение эффективности передачи энергии.

Согласно измеренным данным эффективность преобразования энергии потока плазмы в излучение $\eta_{hv} = Q_{hv}/Q_{пл}$ составляет 20—30%. При этом более 50% энергии остаётся в обтекающем мишень плазменном потоке, что также указывает на возможность увеличения эффективности преобразования энергии за счёт оптимизации режимов работы КСПУ, выбора сорта плазмообразующего газа и расхода газа и подтверждает актуальность дальнейшего исследования баланса энергий в соответствии с представленной в статье методикой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-21007_мк.

REFERENCES

1. **Morozov A.I.** Introduction to plasmodynamics. — M.: Physmathlit., 2-d ed., 2008. 613 p. (in Russian).
2. **Morozov A.I.** Plasmodynamics. Introductory volume III. — In book: Encyclopedia of low temperature plasma. Ed. by Fortov V.E. — M.: Nauka (Science), 2000, раздел IX, pp. 383—574 (in Russian).
3. **Morozov A.I.** Physical foundations of space electric jet engines. — M.: Atomizdat, 1978. 326 p. (in Russian).
4. **Physics** and application of plasma accelerators. Ed. by Morozov A.I. — Minsk: Nauka i tekhnika (Science and technology), 1974, pp. 78—102 (in Russian).
5. **Morozov A.I.** About processes in magnetic plasma compressor. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1975, vol. 1, № 2, pp. 179—191 (in Russian).

6. **Morozov A.I.** Principles of coaxial (quasi) steady plasma accelerators (QSPA). — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1990, vol. 16, № 2, pp. 131—146 (in Russian).
7. **Voloshko A.Yu., Garkusha I.E., Morozov A.I., Solyakov D.G., Tereshin V.I., Tsarenko A.V., Cheboterev V.V.** Investigation of the local view of plasma flux in the two-stage QSPA. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1990, vol. 16, № 2, pp. 168—175 (in Russian).
8. **Belan V.G., Zolotarev S.P., Levashov V.F., Maynashev V.S., Morozov A.I., Podkovyrov V.L., Skvortsov Yu.V.** Experimental study of quasi-stationary plasma accelerator powered by inductive and capacitive storages. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1990, vol. 16, № 2, pp. 176—185 (in Russian).
9. **Ananin S.I., Astashinskiy V.M., Bakanovich G.I., Kostyukovich E.A., Kuzmitskiy A.M., Man'kovskiy A.A., Min'ko L.Ya., Morozov A.I.** Investigation of processes of plasma fluxes formation in quasi-stationary high-current plasma accelerator (QSPA). — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1990, vol. 16, № 2, pp. 186—196 (in Russian).
10. **D'yakonov G.A., Tikhonov V.B.** Experimental study of the influence of accelerator channel geometry and external magnetic field on plasma fluxes regimes in coaxial quasi-stationary plasma accelerator (QSPA) like P-50A. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1994, vol. 20, № 6, pp. 533—540 (in Russian).
11. **Federici G., Zhitlukhin A., Arkhipov N., Klimov N., Podkovyrov V., Safronov V., Giniyatulin R., Landman I., Loarte A., Merola M.** Effects of ELMs and disruptions on ITER divertor armour materials. — *J. of Nuclear Materials*, 2005, vol. 337—339, pp. 684—690.
12. **Zhitlukhin A., Klimov N., Podkovyrov V., Safronov V., Maynashev V., Levashov V., Muzichenko A., Linke J., Hirai T., Landman I., Bazylev B., Pestchanyi S., Loarte A., Merola M., Federici G.** Effects of ELMs on ITER divertor armour materials. — *J. of Nuclear Materials*, 2007, vol. 363—365, pp. 301—307.
13. **Tereshin V.I., Bandura A.N., Byrka O.V., Chebotarev V.V., Garkusha I.E., Landman I., Makhraj V.A., Neklyudov I.M., Solyakov D.G., Tsarenko A.V.** Application of powerful quasi-steady-state plasma accelerators for simulation of ITER transient heat loads on divertor surfaces. — *Plasma Phys. Contr. Fusion*, 2007, vol. 49, pp. A231—A239.
14. **Klimov N., Podkovyrov V., Zhitlukhin A., Kovalenko D., Bazylev B., Landman I., Pestchanyi S., Janeschitz G., Federici G., Merola M., Loarte A., Linke J., Hirai T., Compan J.** Experimental study of PFCs erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA. — *J. of Nuclear Materials*, 2009, vol. 390—391, pp. 721—726; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.01.197>.
15. **Garkusha I.E., Arkhipov N.I., Klimov N.S., Makhraj V.A., Safronov V.M., Landman I.S., Tereshin V.I.** The latest results from ELM-simulation experiments in plasma accelerators. — *Physica Scripta*, 2009, vol. 2009, № 138, p. 014054.
16. **Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Zhitlukhin A.M., Safronov V.M., Kovalenko D.V., Moskacheva A.A., Poznyak I.M.** Tungsten splashing under intense plasma flow. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2009, issue 2, pp. 52—61; http://vant.iterru.ru/vant_2009_2/3.pdf (in Russian).
17. **Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Zhitlukhin A.M., Arkhipov N.I., Safronov V.M., Barsuk V.A., Poznyak I.M., Loarte A., Merola M., Linke J.** The effect of intense pulsed plasma fluxes on protective materials of thermonuclear reactor intrachamber components. — *Yadernaya fizika i inzhiniring (Nuclear Physics and Engineering)*, 2010, vol. 1, № 3, pp. 210—219; <http://elibrary.ru/item.asp?id=15525071> (in Russian).
18. **Klimov N., Podkovyrov V., Zhitlukhin A. et al.** Experimental study of PFCs erosion and eroded material deposition under ITER-like transient loads at the plasma gun facility QSPA-T. — *J. of Nuclear Materials*, 2011, vol. 415, pp. S59—S64; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.01.013>.
19. **Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Kovalenko D.V. et al.** Experimental study of divertor plasma-facing components damage under a combination of pulsed and quasi-stationary heat loads relevant to expected transient events at ITER. — *Physica Scripta T*, 2011, vol. 2011, T145, p. 014064; <http://dx.doi.org/10.1088/0031-8949/2011/T145/014064>.
20. **Kovalenko D.V., Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Muzichenko A.D., Zhitlukhin A.M., Khimchenko L.N., Kupriyanov I.B., Giniyatulin R.N.** First experiments at the QSPA-Be plasma gun facility. — *Physica Scripta*, 2011, vol. 2011, p. 014065; <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2011/T145/014065>.
21. **Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Zhitlukhin A.M. et al.** Plasma-facing materials erosion under ITER-like transient loads at QSPA plasma gun facility. — *Fusion Science and Technology*, 2014, vol. 66, № 1, pp. 118—124; <http://dx.doi.org/10.13182/FST13-759>.
22. **Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Kupriyanov I.B. et al.** Beryllium layer response to ITER-like ELM plasma pulses in QSPA-Be. — *Nuclear Materials and Energy*, 2017, vol. 12, pp. 433—440. SCImago J. Rank (SJR) 2017: 0.778. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352179116301570>.

23. **Kovalenko D.V., Klimov N.S., Podkovyrov V.L. et al.** Behavior of divertor and first wall armour materials at plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs and disruptions. — *Nuclear Materials and Energy*, 2017, vol. 12, pp. 156—163. SCImago J. Rank (SJR) 2017: 0.778. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352179116301697>.
24. **Kovalenko D.V., Д.В., Klimov N.S., Zhitlukhin A.M. et al.** Generation of argon plasma flows and transformation of the flow energy to the radiation at the QSPA-T facility for modeling the radiation loads typical for ITER mitigated disruption. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2014, vol. 37, issue 4, pp. 39—48; http://vant.iterru.ru/vant_2014_4/5.pdf (in Russian).
25. **Klimov N.S., Linke J., Pitts R.A. et al.** Stainless steel performance under ITER-relevant mitigated disruption photonic heat loads. — *J. of Nuclear Materials*, 2013, vol. 438, pp. S241—S245; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.036>.
26. **Klimov N.S., Putrik A.B., Linke J. et al.** Plasma facing materials performance under ITER-relevant mitigated disruption photonic heat loads. — *J. of Nuclear Materials*, 2015, vol. 463, pp. 61—65; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.11.098>.
27. **Morozov A.I., Solov'ev L.S.** Stationary plasma fluxes in magnetic field. — *Voprosy teorii plazmy (Problems of Plasma Theory)*. Ed. by Leontovich M.A. — M.: Atomizdat, 1974, issue 8, pp. 3—87 (in Russian).
28. **Brushlinskiy K.V., Morozov A.I.** Calculation of plasma two-dimensional fluxes in channels. — In the same place, pp. 88—163 (in Russian).
29. **Brushlinskiy K.V., Morozov A.I.** Analysis of plasma two-dimensional fluxes in channels. — In book: *Encyclopedia of low temperature plasma*. Ed. by Fortov V.E. — M.: Yanus-K, 2008, Ser. B, vol. IX-2, pp. 334—369 (in Russian).
30. **Vatazhin A.B., Lyubimov G.A., Regirer S.A.** MHD fluxes in channels. — M.: Physmathlit, 1970. 672 p. (in Russian).
31. **Brushlinskiy K.V.** Mathematical and calculating problems of magnetic gas dynamics. — M.: Binom. Laboratory of knowledges, 2009. 200 p. (in Russian).
32. **Kozlov A.N.** Influence of longitudinal magnetic field on Hall effect in plasma accelerator channel. — *Izvestiya RAN. Mekhanika Zhidkosti i Gaza (A Journal of Russian Academy of Sciences. Fluid Dynamics)*, 2003, № 4, pp. 165—175 (in Russian).
33. **Kozlov A.N.** Basis of the quasi-steady plasma accelerator theory in the presence of a longitudinal magnetic field. — *J. Plasma Physics*, 2008, vol. 74, № 2, pp. 261—286.
34. **Brushlinskiy K.V., Gorshenin K.P., Syts'ko Yu.I.** Mathematical models of stationary MHD-fluxes in plasma accelerators channels. — *Matematicheskoe modelirovanie (Mathematical simulation)*, 1991, vol. 3, № 10, pp. 3—19 (in Russian).
35. **Kozlov A.N.** Modeling of rotating streams in the plasma accelerator channel with longitudinal magnetic field. — *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*, 2005, № 1, pp. 104—106.
36. **Kozlov A.N.** Dynamics of rotating fluxes in plasma accelerator channel with longitudinal magnetic field. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2006, vol. 32, № 5, pp. 413—422 (in Russian).
37. **Kozlov A.N., Zaborov A.M.** Formation of the current attachments in plasma accelerator channel under influence of the longitudinal magnetic field. — *Problems of Atomic Sci. and Techn. Ser.: Plasma Physics*, 2006, № 12, pp. 93—96.
38. **Kozlov A.N.** Generation of the magnetic field in the compressible plasma streams. — *Problems of Atomic Sci. and Techn. Ser.: Plasma Physics*, 2008, № 6, pp. 101—103.
39. **Kozlov A.N.** Basis of the quasi-steady plasma accelerator theory in the presence of a longitudinal magnetic field. — *J. Plasma Physics*, 2008, vol. 74, № 2, pp. 261—286.
40. **Kozlov A.N.** Two-liquid MHD model of plasma fluxes in quasi-stationary accelerator with longitudinal magnetic field. — *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika (Applied mechanics and technical physics)*, 2009, vol. 50, № 3, pp. 44—55 (in Russian).
41. **Kozlov A.N.** Influence of geometry of the impenetrable electrodes on process of formation of the current crisis in the plasma accelerators. — *Problems of Atomic Sci. and Techn. Ser.: Plasma Physics*, 2010, № 6, pp. 97—99.
42. **Kozlov A.N., Drukarenko S.P., Seytkhalilova E.I., Solyakov D.G., Velichkin M.A.** The comparative analysis of the compressible plasma streams generated in QSPA from the various gases. — *Problems of Atomic Sci. and Techn. Ser. Plasma Physics*, 2012, № 6, pp. 120—122.
43. **Kozlov A.N.** Investigation of near-electrode processes in quasi-stationary plasma accelerators with impermeable electrodes. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2012, vol. 38, № 1, pp. 15—25 (in Russian).
44. **Kozlov A.N., Drukarenko S.P., Klimov N.S., Moskacheva A.A., Podkovyrov V.L.** The experimental research of the electric characteristics of discharge in the quasi-steady plasma accelerator with the longitudinal magnetic field. — *Problems of Atomic Sci. and Techn. Ser.: Plasma Physics*, 2009, № 1, pp. 92—94.

45. **Drukarenko S.P., Klimov N.S., Kozlov A.N., Moskacheva A.A., Podkovyrov V.L.** Near-electrode processes in quasi-stationary plasma accelerator (QSPA) with longitudinal magnetic field. — In coll.: Physics of the matter extreme states, 2008. Ed. by Fortov V.E. et al. — Chernogolovka: Pub. house of the Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, 2008, pp. 262—265 (in Russian).

AUTHORS

Klimov N.S. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; klimov@triniti.ru

Kovalenko D.V. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; kovalenko@triniti.ru

Podkovyrov V.L. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; podk@triniti.ru

Kochnev D.M. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; dimich17@triniti.ru

Yaroshevskaya A.D. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; yaroshad@triniti.ru

Urlova R.V. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; urlova@triniti.ru

Kozlov A.N. M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Miusskaya sq. 4, 125047 Moscow, Russia

Konovalov V.S. M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Miusskaya sq. 4, 125047 Moscow, Russia; v.s.konovalov@yandex.ru

Received 14 June 2019

Revised 20 June 2019

Accepted 25 June 2019

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 3, pp. 52—63