

А.Б. Тажен, А.Х. Сулейменова, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов
НИИЭТФ, Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Алматы, Казахстан, aigerim_tzh@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ ПРОВОЛОЧНОГО КАЛОРИМЕТРА

Аннотация. В данной работе представлены результаты по экспериментальным исследованиям энергетических характеристик импульсной плазмы. Эксперименты проводились на плазменном ускорителе ИПУ-30. Токи плазмы измерялись поясом Роговского, результаты данного измерения также представлены в данной работе. С помощью проволочного калориметра, установленного на расстоянии 25 см от системы электродов, были получены осциллограммы падения напряжения на шунтирующем сопротивлении во время взаимодействия с плазменным потоком. На основе полученных осциллограмм были рассчитаны плотности энергии плазменного потока в зависимости от напряжения разряда. Кривая зависимости плотности энергии плазменного потока от напряжения разряда показала, что величина разрядного напряжения определяет величину кинетической энергии. Если его постепенно увеличивать, то подвижность заряженных частиц будет расти, их кинетическая энергия увеличится. В ходе работы также было замечено, что проволочный калориметр может работать в качестве электрического зонда. Этому свидетельствуют отклонения напряжения в цепи, которые отчетливо видны на некоторых осциллограммах. Полученные результаты исследования энергетических характеристик импульсной плазмы показали, что при напряжении 13 кВ максимальная плотность энергии составляет 98 Дж/см².

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, ТОКАМАК, импульсный плазменный поток, резистивный калориметр.

Введение

С восьмидесятых годов прошлого столетия по сегодняшний день очень активно развивается интерес к созданию управляемого термоядерного синтеза в реакторах с магнитным удержанием, в целях бытового и промышленного использования. И в этой связи ТОКАМАК (тороидальная камера с магнитными катушками) считается наиболее перспективным устройством для его осуществления.

Основной проблемой управляемого термоядерного синтеза, как известно, является образование пыли в результате взаимодействия плазмы с компонентами реактора, размещенными внутри камеры [1]. Известно, что пылеобразование в токамаках приводит к уменьшению их рабочих ресурсов, которые в свою очередь связаны с различными процессами, самое главное это – неустойчивое горение плазмы (срыв плазменного шнура).

Во многих работах, посвященных исследованию процессов пылеобразования на установках, как ТЯЭР импульсно-плазменные ускорители находят наиболее широкое применение в качестве инициаторов мощных импульсных потоков плазмы. Скорости плазменных потоков, получаемых на ИПУ, лежат в пределах $10 - 10^3$ км/с [2,3]. В отличие от других ускорителей заряженных частиц, в ИПУ ускоряются заряженные частицы двух сортов одновременно (электроны и ионы). Ускорение происходит за счет Амперовой силы.

Такие ускорители также дают возможность изменять в широких пределах большой энергозапас плазменного сгустка, энергию частиц, ток, тем самым дав возможность приблизиться к параметрам, очень близким к термоядерным.

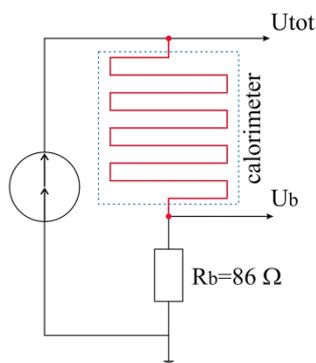


Рисунок 1 – Электрическая схема калориметра

Существуют различные контактные методы исследования энергетических свойств импульсных плазменных потоков, получаемых в плазменных ускорителях, например, детекторы, калориметры и т.д. В данной работе был использован проволочный калориметр (рисунок 1).

Калориметр представляет собой помещаемую на пути плазменного потока рамку, контур натянутых на одинаковом расстоянии вольфрамовых проволок [4].

Принцип работы калориметра основан на следующем: ускоренный горячий плазменный сгусток проходит через сетку, в результате чего, проволоки нагреваются. Калориметр до нагрева обладает сопротивлением при комнатной температуре R_0 . После нагрева сопротивление изменится, за счет поглощённого проволоками тепла. Диапазон этого изменения дает значение энергии плазменного сгустка:

$$\omega = \frac{\Delta x}{d} \cdot \frac{c\rho S_{\Pi}^2}{\alpha\rho_0 S_{\kappa}} \cdot \Delta R, \quad (1)$$

где ρ – плотность вольфрама, c – удельная теплоемкость, ρ_0 – удельное сопротивление вольфрама до начала нагрева, α – температурный коэффициент сопротивления, Δx – расстояние между проволоками, d – диаметр, S_{Π} – площадь сечения проволоки, S_{κ} – площадь рамки.

Эксперименты проводились на плазменном ускорителе ИПУ-30, собранном в лаборатории ПППТ НИИЭТФ (см. рисунок 2). Подробное описание дано в работе [5].



Рисунок 2 – Фотоизображения экспериментальной установки

Результаты экспериментов

Токи плазмы при различных разрядных напряжениях измерялись поясом Роговского. Значения токов лежали в пределах 7 кА (при 8 кВ) и 12 кА (при 13 кВ). Осциллограммы, полученные с пояса Роговского, показаны на рисунках 3 и 4.

До начала эксперимента проволочный калориметр был установлен от системы электродов на расстоянии 25 см. Измерения на проволочном калориметре проходили следующим образом: По калориметру пропускался электрический ток от батареи на 1,5 В. Изменения сопротивления калориметра (падение напряжения на шунтирующем сопротивлении $R_{ш}$) регистрировались с помощью электронного осциллографа LeCroy 354 А. Подключение калориметра к осциллографу осуществлялось с помощью электрической схемы, как показано на рисунке 1.

Таким образом, изменяя разрядное напряжение на установке ИПУ-30 от 5 кВ до 13 кВ при постоянном давлении газа (воздуха) в камере $1,8 - 1,9 \cdot 10^{-2}$ торр нами были получены осциллограммы калориметра, одни из примеров которых показаны на рисунках 5 и 6.

При увеличении напряжения разряда напряжение на проволоке падает от начального значения $U_{ш.нач.} = 620$ мВ до 517 мВ (при 5 кВ) и 224 мВ (при 13 кВ). Падение

напряжения определялся глубиной полученного сигнала, как показано на рисунке 5 (также и для осциллограммы 5). В дальнейшем эти данные были использованы для определения плотности энергии импульсной плазмы. В нашем эксперименте максимальное значение плотности энергии импульсного потока составило 98 Дж/см^2 . Результаты показаны на рисунке 7.

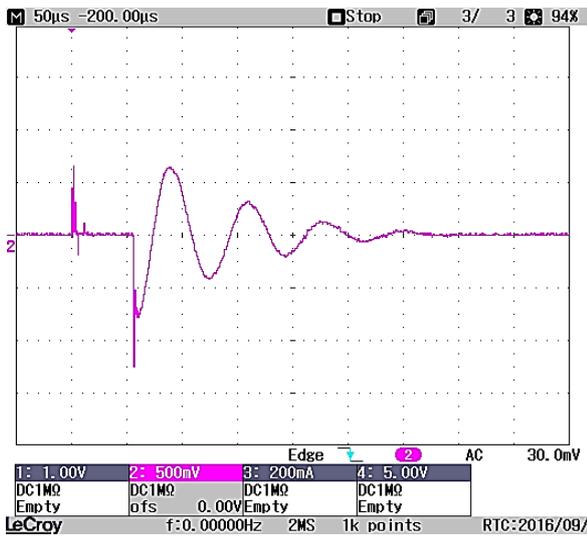


Рисунок 3 – Осциллограмма пояса Роговского ($U=8 \text{ кВ}$; $p=1,6 \cdot 10^{-2}$ торр).

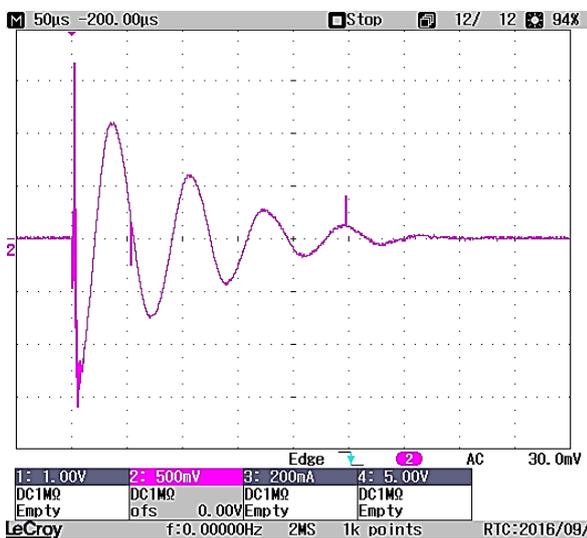


Рисунок 4 – Осциллограмма пояса Роговского ($U=13 \text{ кВ}$; $p=1,8 \cdot 10^{-2}$ торр).

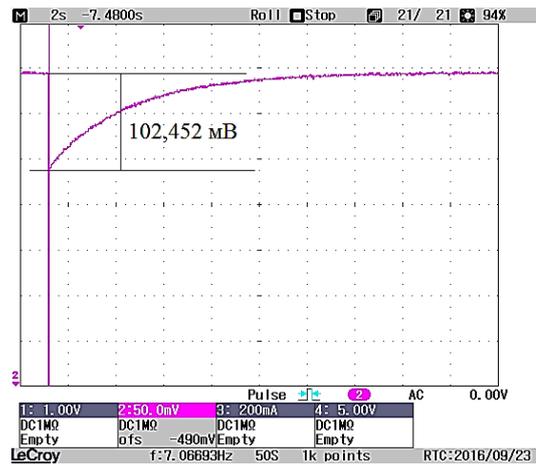


Рисунок 5 – Осциллограмма изменения напряжения на проволочном калориметре ($U=5 \text{ кВ}$; $p=1,8 \cdot 10^{-2}$ торр).

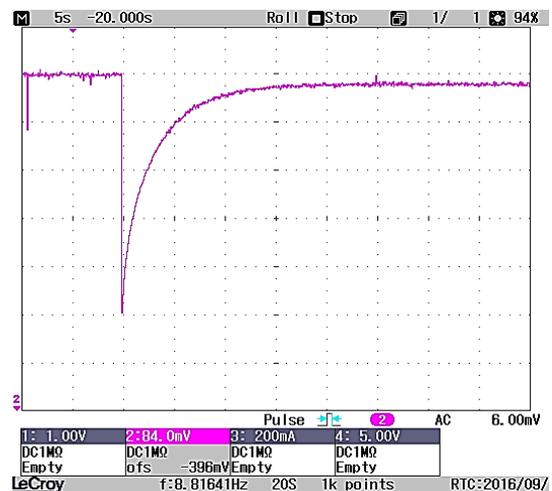


Рисунок 6 – Осциллограмма изменения напряжения на проволочном калориметре ($U=13 \text{ кВ}$; $p=1,8 \cdot 10^{-2}$ торр).

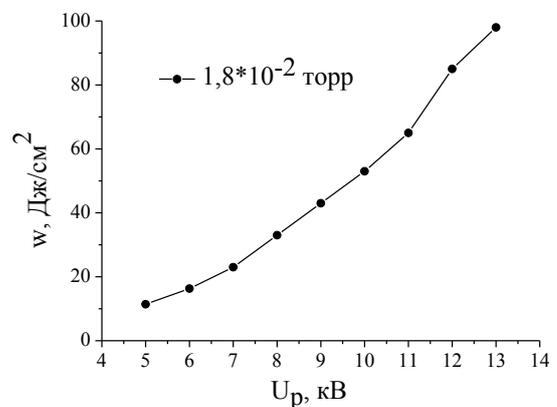


Рисунок 7 – Зависимость плотности энергии импульсной плазмы от напряжения разряда.

Как видно из рисунка 7, при увеличении разрядного напряжения увеличивается плотность энергии плазменного потока, приходящая на единицу площади. Как мы знаем, заряженные частицы импульсной плазмы обладают кинетической энергией, которая зависит от напряжения разряда. Величина разрядного напряжения определяет величину кинетической энергии. Если его постепенно увеличивать, то подвижность заряженных частиц будет расти, их кинетическая энергия увеличится. Исходя из этого, можно сказать, что полученные результаты хорошо соответствуют данному предположению.

Во время возникновения импульсной плазмы проволочный калориметр работает как электрический зонд, то есть собирает электрические заряды. В связи с этим в период этого времени (~400 мкс), как видно из осциллограммы (см. рисунок 8) замечается сильное отклонения значения напряжения в цепи калориметра.

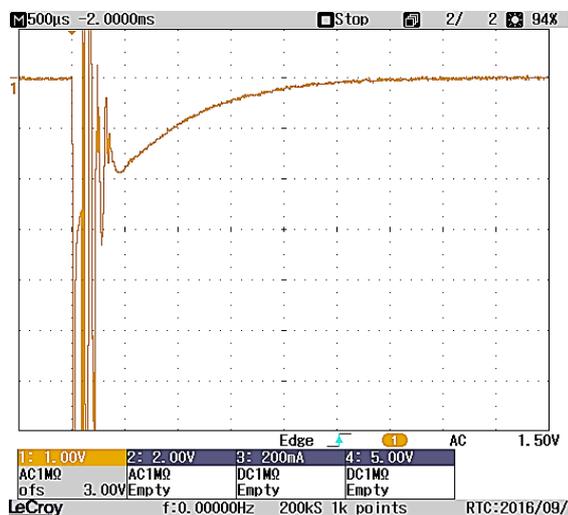


Рисунок 8 – Осциллограмма изменения напряжения на проволочном калориметре

Также, данный период осциллограммы состоит из нескольких микроимпульсов. Это свидетельствует, что плазменный поток срывается и состоит из нескольких плазменных сгустков, появляющихся вслед друг за другом. Промежуток времени между этими разрядами составляет микросекунды. Поэтому в других осциллограммах не были замечены такие явления, так как на осциллографе до начала разряда было установлено временное деление около 1-2 секунда.

Заключение

С помощью проволочного калориметра были определены энергетические характеристики импульсного плазменного потока. По результатам проведенных экспериментов была определена плотность энергии плазменного пучка, которая составила 98 Дж/см² при напряжении разряда 13 кВ.

Литература

- 1 J.C. Flanagan, M. Sertoli, M. Bacharis et al. // Plasma physics and controlled fusion. 2015. Vol. 57. P. 014037
- 2 Морозов А.И. Физика и применение плазменных ускорителей. Минск. Наука и Техника. 1974
- 3 А.М. Zhukeshov // Plasma Devices and Operations. 2009. Vol. 17. No. 1. P. 73–81
- 4 Киреенко А.В., Мурахтин С.В. // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия «Термоядерный Синтез». 2008. Т. 1. Стр. 26-30
- 5 М.К. Досболаев, А.У. Утегенов, А.Б. Тажен, Т.С. Рамазанов, М.Т. Габдуллин // Известия НАН РК, серия физико-математическая, 6 (310), стр. 59-66 (2016).

Принято к печати 15.08.2017

А.Б. Тажен, А.Х. Сулейменова, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов
НИИЭТФ, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, 050040, Алматы,
Казахстан, aigerim_tzh@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ ПРОВОЛОЧНОГО КАЛОРИМЕТРА

Аннотация. В данной работе представлены результаты по экспериментальным исследованиям энергетических характеристик импульсной плазмы. Эксперименты проводились на плазменном ускорителе ИПУ-30. Токи плазмы измерялись поясом Роговского, результаты данного измерения также представлены в данной работе. С помощью проволочного калориметра, установленного на расстоянии 25 см от системы электродов, были получены осциллограммы падения напряжения на шунтирующем сопротивлении во время взаимодействия с плазменным потоком. На основе полученных осциллограмм были рассчитаны плотности энергии плазменного потока в зависимости от напряжения разряда. Кривая зависимости плотности энергии плазменного потока от напряжения разряда показала, что величина разрядного напряжения определяет величину кинетической энергии. Если его постепенно увеличивать, то подвижность заряженных частиц будет расти, их кинетическая энергия увеличится. В ходе работы также было замечено, что проволочный калориметр может работать в качестве электрического зонда. Этому свидетельствуют отклонения напряжения в цепи, которые отчетливо видны на некоторых осциллограммах. Полученные результаты исследования энергетических характеристик импульсной плазмы показали, что при напряжении 13 кВ максимальная плотность энергии составляет 98 Дж/см².

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, ТОКАМАК, импульсный плазменный поток, резистивный калориметр.

А.Б. Тажен, А.Х. Сулейменова, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов
ЭТФЗИ, аль-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 050040,
Алматы, Казахстан, aigerim_tzh@mail.ru

СЫМТЕКТЕС КАЛОРИМЕТРДІҢ КӨМЕГІМЕН ПЛАЗМА АҒЫНЫНЫҢ ЭНЕРГИЯ ТҮҒЫЗДЫҒЫН АНЫҚТАУ

Аннотация. Бұл жұмыста импульсті плазманың энергетикалық қасиеттерін эксперименттік зерттеу нәтижелері көрсетілген. Эксперимент ИПУ-30 импульсті плазма үдеткішінде жүргізілді. Плазма ағынының тогы Роговский белдігімен анықталды. Электродтар жүйесінен 25 см арақашықтықта орналастырылған сымтектес калориметрдің плазма ағынымен әсерлескенде кедергісірің өзгеретіні анықталды және сол кездегі кернеу түсуінің осциллограммалары алынды. Осы кернеу осциллограммаларын өңдеу нәтижесінде, разряд кернеуіне тәуелді плазма ағынының энергия тығыздықтары есептелді. Плазма ағынының разряд кернеуіне тәуелділік қисығы разряд кернеуі шамасы кинетикалық энергия шамасын анықтайтындығын көрсетті: разряд кернеуінің артуымен, зарядталған бөлшектердің қозғалғыштығы жоғарылайды, сәйкесінше олардың кинетикалық энергиялары артады. Жұмыс барысында сонымен қатар сымтектес калориметрдің электрлік зонд ретінде жұмыс жасай алатындығы белгілі болды, оған кейбір осциллограммаларда анық байқалатын электрлік тізбектегі кернеу ауытқулары дәлел. Алынған зерттеу нәтижелері 13 кВ разряд кернеуінде максималды плазма ағынының тығыздық энергиясының шамасы 98 Дж/см² тең болатындығы анықталды.

Түйін сөздер: импульсті плазмалық үдеткіш, ТОКАМАК, импульсті плазмалық ағын, резистивті калориметр

A.B.Tazhen, A.Kh. Suleymenova, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov

IETP, al-Farabi Kazakh National University, 050040, Almaty, Kazakhstan, aigerim_tzh@mail.ru

DEFINITION OF THE DENSITY OF ENERGY OF A PULSED PLASMA FLOW USING A WIRE CALORIMETER

Abstract. In this work, the results of an experimental study of energy properties of pulsed plasma are presented. The experiments were performed on pulsed plasma accelerator PPA-30. The plasma currents were measured by Rogowski's belt, the results of this measurement are also presented in this paper. Using a wire calorimeter, installed at a distance of 25 cm from the electrode system, oscillograms of the voltage drop on the shunt resistance were obtained during interaction with the plasma flow. Based on the obtained oscillograms, the energy densities of the plasma flux were calculated as a function of the discharge voltage. The curve of the dependence of the energy density of the plasma flow on the discharge voltage showed that the value of the discharge voltage determines the value of the kinetic energy. If it is gradually increased, the mobility of the charged particles will increase, their kinetic energy will increase. During work it was also observed that the wire calorimeter can operate as an electrical probe. This is evidenced by the voltage deviation in the chain, which are clearly visible on some oscillograms. The obtained results of the investigation of the energy characteristics of pulsed plasma showed that at a voltage of 13 kV, the maximum energy density is 98 J/cm².

Keywords: pulse plasma accelerator, TOKAMAK, pulsed plasma flow, resistive calorimeter