

Определение полной энергии, теряемой электронным пучком при его взаимодействии с плазмой

А. К. Березин, Я. Б. Файнберг, Л. И. Болотин, Г. П. Березина

В предыдущих работах [1, 2] были описаны эксперименты, в которых при помощи электростатического анализатора с тормозящим полем были определены спектры продольной компоненты энергии импульсного пучка электронов с током 5 и 8,5 а энергией 15 кэв (длительность импульса 3,6 мксек) на входе в область взаимодействия с плазмой, находящейся в продольном магнитном поле напряженностью 400—1320 э, и на выходе из нее. Однако в этих экспериментах анализировалась только часть пучка, составляющая 1—3% от общего тока, проходившего через плазму.

Чтобы дополнить эти эксперименты, при помощи чувствительного калориметра с более высокой степенью точности были измерены относительные полные потери энергии ($\Delta W = \Delta W_{\perp} + \Delta W_{\parallel}$) электронного пучка с указанными выше параметрами в результате его взаимодействия с плазмой. В этих экспериментах в отличие от предыдущих анализировался весь электронный пучок. Однако с помощью калориметра нельзя получить энергетические спектры прошедших электронов, как это было сделано раньше. Таким образом, эти два метода дополняют и уточняют друг друга.

Для измерений использовался циркуляционный калориметр открытого типа. Блок-схема установки вместе с калориметром показана на рисунке. Подробно установка описана в работах [1, 2].

Бак наполнялся непосредственно из водопровода. Приток воды в бак регулировался так, чтобы в водонесущей системе поддерживалось постоянное давление. Затем вода проходила по длинной медной трубке, в результате чего температура воды повышалась до комнатной и попадала в стеклянный конус с входом и выходом, расположенными у его основания. В конусе

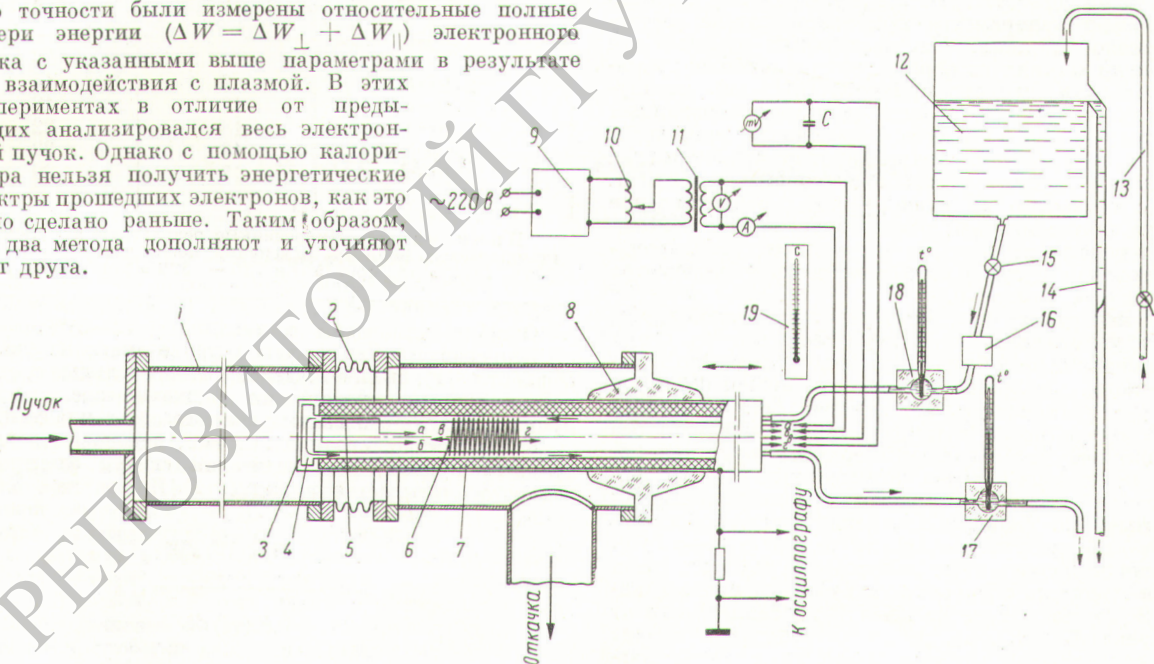


Схема установки для измерения полной энергии пучка с помощью калориметра:

1 — камера; 2 — сильфон; 3 — калориметр; 4 — камера калориметра, охлаждаемая водой; 5 — калибровочный элемент; 6 — термостолбик; 7 — термоизолятор; 8 — изолятор из органического стекла; 9 — электронный стабилизатор; 10 — вариак РНО-250-2; 11 — трансформатор на 220/20 в; 12 — водный бак; 13 — водопровод; 14 — сливная труба; 15 — кран для регулировки потока воды; 16 — устройство для выделения пузырьков воздуха из потока воды; 17 — термометр для измерения температуры потока воды, выходящей из калориметра; 18 — термометр для измерения температуры потока воды, поступающей в калориметр; 19 — термометр для измерения температуры окружающей среды.

из воды удалялись пузырьки газа. Кран, находящийся в верхней части конуса, позволял периодически выпускать скопившийся в нем газ. Поток воды через калориметр регулировался специальным краном.

Из конуса вода поступала в блок термостолбика, нагревательный элемент для калибровки, водяную нагрузку, снова в блок термостолбика, а затем в отводную трубу. Температура потока воды на входе и выходе калориметра дополнительно измерялась термометрами со шкалой 0—50° С с точностью $\pm 0,1^\circ$ С. Разность температур измерялась термостолбиком, устроенным следующим образом. В блоке из органического стекла, обеспечивающем хорошую электрическую и тепловую изоляцию, были просверлены два параллельных канала. Через один канал вода подходит к нагрузке, через второй отводится от нее. Медно-константановый термостолбик из 16 элементов смонтирован в блоке так, что спаи располагаются приблизительно по осевым линиям каналов. Диаметр проволоки, из которой изготовлен термостолбик, составляет 0,1 мм. Сопротивление термостолбика $R_c \approx 20$ ом.

В качестве измерительного прибора использовался милливольтметр М198/2, класса 1,0, со шкалой на 2,3 мв, с сопротивлением $R_m \approx 230$ ом.

При $R_c \ll R_m$ градуировка прибора в единицах мощности более линейная, чем в случае, когда $R_c \gg R_m$ [3, 4]. Для устранения влияния на милливольтметр высокочастотных наводок последний шунтировался малой емкостью ($C \approx 0,05$ мкф).

При измеряемой мощности 12—22 ат и потоке воды через калориметр около 2 см³/сек милливольтметр обеспечивал показания в пределах 40—75 делений (100 делений соответствуют 2,3 мв). Тепловая постоянная времени калориметра при таком потоке составляла около 1,5 мин. Нагревательный элемент для калибровки состоял из отрезка высокоомной нихромовой проволоки (диаметр примерно 0,15 мм), натянутой вдоль оси трубки, и питался стабилизированным напряжением 220 в от сети переменного тока через вариак и понижающий трансформатор. Стабилизация напряжения осуществлялась электронным стабилизатором с точностью не хуже $\pm 0,5\%$ сопротивление элемента при комнатной температуре ≈ 10 ом. Мощность, идущая в нагревательный элемент, регулировалась вариакром и измерялась при помощи вольтметра и амперметра класса 0,5.

Весь калориметр был смонтирован в длинной трубе, которая уплотнялась на вакуум так, что во время эксперимента можно было подвинуть калориметр в начало камеры (для измерения энергии пучка на входе в камеру) и отодвинуть его в конец (для измерения энергии пучка после взаимодействия с плазмой) без изменения вакуума в камере. Передний торец калориметра, на который падал электронный пучок, для уменьшения вторичной эмиссии покрывался тонким слоем аквадага. Точность измерений при помощи описанного калориметра составляла около $\pm (1-1,5)\%$.

С использованием этого калориметра была измерена средняя мощность электронного пучка на входе в камеру (W_1) и на выходе из нее (W_2) в зависимости от тока пучка (5 и 8,5 а), давления воздуха в камере (плотности плазмы), напряженности продольного магнитного поля в пределах 400—1320 э для тока 5 а и 720—1320 э для тока 8,5 а. Для проверки калориметрического метода средняя мощность электронного пучка, измеренная методом замещения, сравнивалась со средней мощностью, необходимой для нагрева заданного потока воды, проходящего через калориметр. Для этого при помощи термометров измерялись температуры

воды на входе в калориметр и выходе из него и средняя скорость потока воды. Во всех измерениях разность температур не превышала 3° С и измерялась с точностью $\pm (6-7)\%$. Скорость потока измерялась с точностью 5%. Значения средних мощностей, измеренных указанными выше способами, совпали с точностью до 10%, что, вероятно, объясняется приведенными выше ошибками измерения разности температур и скорости потока воды.

Средняя мощность электронного пучка, определенная с помощью калориметра, также сравнивалась со средней мощностью, которую можно было получить, зная ток, энергию пучка, длительность импульса и частоту посылок. Эти данные совпали в пределах 10—15%. Это, вероятно, объясняется ошибками, возникающими при измерении параметров пучка при помощи электронно-лучевого осциллографа. Относительные полные потери энергии электронного пучка в результате его взаимодействия с плазмой определены из соотношения

$$\Delta W = 1 - \frac{W_2}{W_1} \quad (1)$$

и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Относительные полные потери энергии электронного пучка в результате его взаимодействия с плазмой, %

Давление воздуха, мм рт. ст.	Ток пучка, а	
	5	8,5
$2 \cdot 10^{-5}$	9	14
$2 \cdot 10^{-4}$	12	18
$4 \cdot 10^{-4}$	18	22
$6 \cdot 10^{-4}$	18	22
$2 \cdot 10^{-3}$	17	20

Примечание. Приведенные результаты не зависят от магнитного поля при изменении последнего в пределах 400—1320 э для тока 5 а и 720—1320 э для тока 8,5 а.

Ошибка измерений составляла $\pm (2-3)\%$.

Для сравнения из графиков, приведенных на рис. 2 и 3 работы [1], были определены относительные средние потери энергии продольного движения электронного пучка в результате взаимодействия его с плазмой.

Как известно, средняя энергия, переносимая электронным пучком, энергетический спектр электронов которого описывается функцией $F(W)$, равна

$$W_{cp} = \frac{\int_0^{\infty} WF(W) dW}{\int_0^{\infty} F(W) dW}, \quad (2)$$

где W — энергия. Отсюда по спектрам энергии продольного движения электронного пучка на входе в камеру [$F_1(W)$] и на выходе из нее [$F_2(W)$] легко найти относительные средние потери $\Delta W_{||}$ энергии продольного движения электронного пучка в результате взаимодействия с плазмой.

Таблица 3

Значения $\Delta W_{||}$ для тока 8,5 а, %

Давление газа, мм рт. ст.	Напряженность продольного магнитного поля, э			
	1320	960	720	480
$2 \cdot 10^{-5}$	40	14	17	15
$9 \cdot 10^{-5}$	40	13	17	17
$(4 \div 6) \cdot 10^{-4}$	15	15	17	19
$2 \cdot 10^{-3}$	27	—	26	23

Значения $\int_0^{\infty} F_1(W) dW$ и $\int_0^{\infty} F_2(W) dW$ определяли

планиметром из графиков, аналогичных приведенным на рис. 2 и 3 работы [1], но выполненным в большем масштабе.

Для определения $\int_0^{\infty} WF_1(W) dW$ и $\int_0^{\infty} WF_2(W) dW$

строили кривые $WF_1(W)$ и $WF_2(W)$ и при помощи планиметра находили значения указанных выше интегралов. Площади измеряли со среднеквадратичной ошибкой $\pm 1,5\%$. Полная ошибка измерений составляла $\pm 6\%$.

Значения $\Delta W_{||}$ вычислялись для токов 5 и 8,5 а при различных значениях напряженности продольного магнитного поля и давления рабочего газа в плазменной камере (табл. 2, 3).

Таблица 2

Значения $\Delta W_{||}$ для тока 5 а, %

Давление газа, мм рт. ст.	Напряженность продольного магнитного поля, э			
	1320	720	360	240
$2 \cdot 10^{-5}$	16	15	12	—
$9 \cdot 10^{-5}$	17	16	16	—
$(4 \div 6) \cdot 10^{-4}$	22	22	18	23
$2 \cdot 10^{-3}$	25	26	26	—

Среднеквадратичная ошибка измерений $\pm 6\%$. Сравнивая результаты, приведенные в табл. 2 и 3, с результатами табл. 1, можно отметить, что они в пределах ошибок измерений согласуются друг с другом.

Поступило в Редакцию 4/VI 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. К. Березин и др. «Атомная энергия», 14, 249 (1963).
2. А. К. Березин и др. В сб. «Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций». Вып. III. Киев, Изд-во АН УССР, 1963, стр. 125.
3. В сб. «Техника измерений на сантиметровых волнах». Вып. II. М., «Советское радио», 1949, стр. 133.
4. Э. А. Гинзтон. Измерения на сантиметровых волнах. М., Изд-во иностр. лит., 1960, стр. 246, 247.

УДК 533.9

О работе цилиндриителя в стеллараторе

Б. И. Гаврилов, Ф. В. Карманов, Г. П. Максимов

Для изучения физики плазмы и управляемых термоядерных реакций используются магнитные поля сложной конфигурации. В частности, представляет интерес изучение магнитного поля с винтовой симметрией, используемого, например, в стеллараторе [1] и получаемого суперпозицией однородного продольного поля и поля, образованного парами винтовых проводников с чередующимися направлениями тока. Такое поле интересно тем, что в замкнутых системах оно обладает замкнутыми магнитными поверхностями. Поперечное сечение этих поверхностей, образованных трехзаходной винтовой обмоткой ($n = 3$), имеет вид фигур, близких по форме к равностороннему треугольнику.

На практике в ловушках с такими полями иногда желательно иметь участки с аксиально симметричным магнитным полем. На этих участках необходимо треугольные магнитные поверхности превращать в цилиндрические и, чтобы не разрушить замкнутые магнитные поверхности, заботиться о хорошем «спивании» их при переходе из винтовой области в область с аксиальной симметрией. Этот процесс называется «цилиндрированием» магнитных поверхностей, а участки винтовых проводников, в области которых происходит цилиндрирование, получили название цилиндриителей. Конструктивно они могут быть выполнены в виде коротких участков винто-

вой обмотки, отличающихся от основной либо величиной тока, либо шагом.

Приближенные расчеты цилиндриителей даны в работе [2]. В настоящей статье приводятся результаты экспериментальной проверки работы одного из вариантов цилиндриителя.

Цилиндрирование винтовых магнитных поверхностей, образованных трехзаходной винтовой обмоткой, изучалось методом развертки электронных лучей. Электронный источник, позволяющий получить 19 электронных пучков, помещался в аксиально симметричное магнитное поле. Электронные пучки разворачивались по окружностям и, проходя через область исследуемого винтового магнитного поля вдоль магнитных силовых линий, фиксировались на флуоресцирующем экране.

Вакуумная камера установки была изготовлена из немагнитной нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т. Ее внутренний диаметр был равен 10 см, а длина от электронного источника до флуоресцирующего экрана составляла 2,3 м. Рабочий вакуум в установке поддерживался в пределах $2 \cdot 10^{-5} \div 8 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.

Постоянное продольное магнитное поле создавалось системой катушек, расположенных друг от друга на расстоянии, равном $2/3$ среднего радиуса катушек ($r_{cp} = 15$ см). Максимальная напряженность поля