

ПРОВОЛОЧНЫЙ КАЛОРИМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГОСОДЕРЖАНИЯ МОЩНЫХ АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ

А.В. Киреенко, С.В. Мурахтин (Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН)

На установке газодинамическая ловушка (ГДЛ) для нагрева плазмы используется система мощных атомарных инжекторов. В статье описан проволочный калориметр для измерения энергосодержания мощных атомарных пучков. Конструкция калориметра представляет собой сетку из тонких вольфрамовых проволочек, которая помещается на пути измеряемого пучка. Энергосодержание пучка вычисляется по изменению сопротивления нагретых им проволочек. Высокая прозрачность устройства позволяет измерять энергосодержание пучка, не возмущая сам пучок. Используя систему из двух проволочных калориметров, можно рассчитать энергию, захваченную плазмой за весь период инжекции, по измеренному энергосодержанию пучка до и после прохождения его сквозь плазму.

A WIRE CALORIMETER FOR POWERFUL NEUTRAL BEAMS ENERGY MEASUREMENTS. A.V. KIREENKO, S.V. MURAKHTIN. A powerful neutral beam injection system is used for plasma heating at gasdynamic trap (GDT) facility. A wire calorimeter for injected neutral beam energy measurements is described in this article. The calorimeter is a net of thin tungsten wires placed on the neutral beam way. A total beam energy is derived from the wires resistance rise caused by heating. Because of small wire diameter the net has high transparency. Therefore the net doesn't disturb the measured beam (the less than 1% of the beam particles is adsorbed by wires). This fact allows us to setup the calorimeter between an injector and plasma on the beam way. The system consisted of two such calorimeters allows us to derive energy, which is adsorbed by the plasma, from beams energies measured before the beam passing through the plasma and after that.

ВВЕДЕНИЕ

Инжекция атомарных пучков широко используется для нагрева и диагностики плазмы в современном плазменном эксперименте. В этой статье описан проволочный калориметр для измерения энергосодержания мощных атомарных пучков и приведены результаты его испытания, выполненные на установке газодинамическая ловушка (ГДЛ) [1]. Калориметр представляет собой помещаемую на пути пучка сетку, состоящую из вольфрамовых проволочек диаметром d , натянутых параллельно на одинаковом расстоянии ΔX одна от другой (рис. 1, сверху). Энергосодержание пучка, прошедшего сквозь сетку, определяется по изменению сопротивления нагретых им проволочек. Основное достоинство проволочного калориметра — его высокая прозрачность (проволоки поглощают менее 1% атомов проходящего сквозь калориметр пучка).

Высокая прозрачность позволяет производить измерение энергосодержания пучка до его инжекции в плазму без внесения в пучок существенных возмущений. Таким образом, установив на пути пучка два проволочных калориметра (один измеряет энергосодержание пучка до инжекции в плазму, другой — после прохождения сквозь

нее), можно измерить ослабление пучка в плазме и тем самым определить захваченную ею энергию.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Проволочный калориметр помещается на пути мощного атомарного пучка, который, проходя сквозь проволочную сетку, нагревает ее, что приводит к изменению сопротивления проволочек. Энергосодержание пучка рассчитывается по следующей схеме. Изменение удельного сопротивления вольфрама ρ при его нагреве в линейном приближении можно описать выражением

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (1)$$

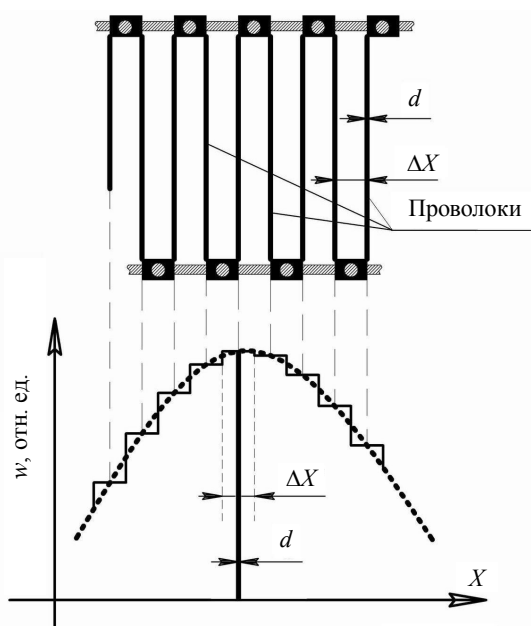


Рис. 1. Проволочный калориметр (w — энергосодержание на единицу площади пластины, поглощающей пучок)

где ρ_0 — удельное сопротивление до начала нагрева; α — температурный коэффициент сопротивления; ΔT — изменение температуры металла в результате нагрева [2]. Тогда сопротивление R одной проволочки рамки после ее нагрева пучком равняется

$$R = \int_L \frac{\rho(l)}{S} dl = \int_L \frac{\rho_0(1+\alpha\Delta T(l))}{S} dl = \frac{\rho_0 L}{S} + \frac{\alpha\rho_0}{S} \int_L \Delta T(l) dl = R_0 + \Delta R, \quad (2)$$

где l — координата вдоль проволоки; L, S — ее длина и площадь сечения соответственно; $R_0, \Delta R$ — начальное сопротивление и изменение сопротивления в результате нагрева соответственно. Энергия $E_{\text{п}}$, поглощенная одной проволочкой рамки, связана с изменением ее сопротивления ΔR следующим выражением:

$$E_{\text{п}} = \int_L c\rho_{\text{вещ}} S \Delta T(l) dl = c\rho_{\text{вещ}} S \int_L \Delta T(l) dl = \frac{c\rho_{\text{вещ}} S^2}{\alpha\rho_0} \Delta R, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{вещ}}, c$ — плотность и удельная теплоемкость материала проволоки. То есть для измерения энергии, поглощенной проволокой, достаточно померить ее сопротивление до нагрева пучком и после него.

Учитывая, что проволочная сетка поглощает только малую часть частиц пучка, которая равна отношению площади проволоки Ld к площади секции рамки $L\Delta X$, прилегающей к ней (см. рис. 1). Запишем выражение для определения энергосодержания пучка $E_{\text{пуч}}$:

$$E_{\text{пуч}} = \frac{\Delta X}{d} \sum_{\text{по всем проволочкам рамки}} E_{\text{п}} = \frac{c\rho_{\text{вещ}} S^2}{\alpha\rho_0} \frac{\Delta X}{d} \sum_{\text{по всем проволочкам рамки}} \Delta R. \quad (4)$$

Суммирование можно выполнить, соединив все проволоки последовательно $\Delta R_{\Sigma} = \Sigma \Delta R$, что и было сделано в эксперименте. Снизу на рис. 1 проведено графическое сравнение энергосодержания пучка, измеренного проволочным калориметром, с энергосодержанием, измеренным сплошным калориметром (например, медной платиной, поглощающей весь пучок). На графике изображены две кривые. Кривая, изображенная пунктиром, — профиль выделения энергии пучка на пластине, установленной вместо проволочного калориметра, а интеграл по этому профилю (площадь под кривой) — полное энергосодержание пучка. Площадь, лежащая под другой сплошной ломаной кривой, — результат расчета энергосодержания пучка по формуле (4) (площадь столбца шириной ΔX равняется $\frac{\Delta X}{d} E_{\text{п}}$). Таким образом,

замена сплошного калориметра, целиком поглощающего пучок, проволочным эквивалентна замене интегрирования суммированием. Из графика на рис. 1 видно, что площади под кривыми будут практически совпадать, если сделать расстояние между соседними проволоками достаточно малым по сравнению с характерной шириной пучка.

В описываемых экспериментах использовался калориметр, изготовленный из вольфрамовых проволочек диаметром $d = 0,05$ мм, натянутых на расстоянии $\Delta X = 7,5$ мм одна от другой.

СХЕМА РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОЛОК

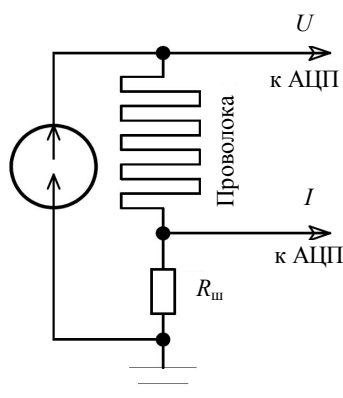


Рис. 2. Схема регистрации сопротивления проволоки

Для определения сопротивления калориметр был включен в электрическую цепь, изображенную на рис. 2. Изменение сопротивления калориметра вычислялось с помощью измерения тока, текущего через шунтирующее сопротивление $R_{\text{ш}}$, и падения напряжения на проволоке. Типичные осциллограммы тока и напряжения с калориметра, полученные во время прохождения пучка сквозь проволочную сетку, показаны на рис. 3. Инъекция пучка идет с 3,5 до 4,5 мс (в это время виден скачок напряжения на проволоке и на шунтирующем сопротивлении). Из-за скачка напряжения было невозможно отслеживать изменение сопротивления проволоки во время инъекции и, следовательно, измерять мощность пучка, поэтому была измерена только интегральная величина энергосодержания пучка за весь период его инъекции.

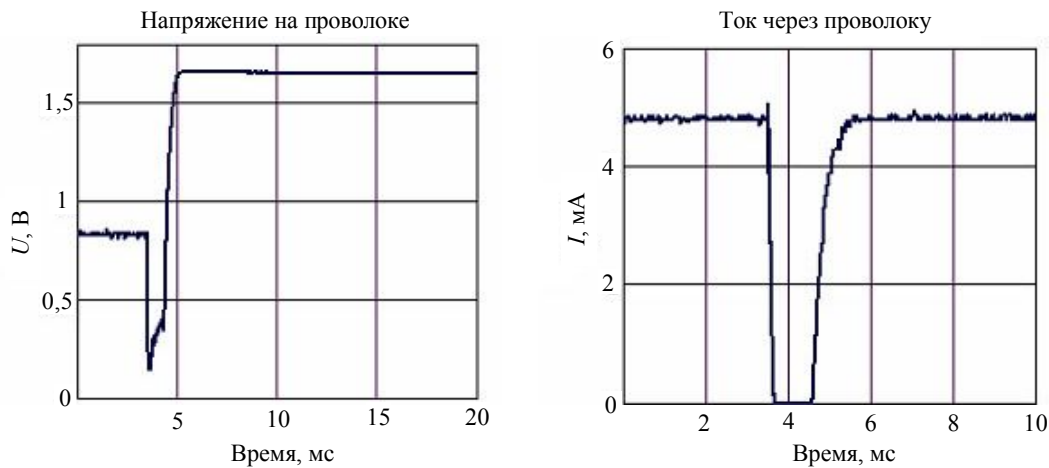


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока с проволочного калориметра

Во время измерений ток через проволоку I поддерживался постоянным (на осциллограмме видно, что он одинаков до и после нагрева проволоки пучком), напряжение же на проволоке после инъекции на величину ΔU больше первоначального из-за увеличения ее сопротивления на величину $\Delta R_{\Sigma} = \Delta U/I$. После нагрева напряжение медленно уменьшается вследствие радиационного остывания проволочки.

ИСПЫТАНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО КАЛОРИМЕТРА

Для экспериментальной проверки предложенного метода рамка проволочного калориметра была установлена на стенку вакуумной камеры ГДЛ, на выходе из тракта одного из шести инжекторов, используемых для нагрева плазмы в установке (рис. 4). Этим калориметром была произведена серия измерений энергосодержания пучка инжектора «Старт-3», используемого для нагрева плазмы в ГДЛ [3]. Инжектор имеет следующие проектные параметры: мощность 600 кВт, энергия инжектируемых атомов (водорода или дейтерия) $E_{инж} = 17$ кэВ, длительность инъекции $\tau_{инж} = 1,1$ мс. «Выстрелы» инжектора (инъекция пучка) производились как при включенном магнитном поле, так и без него. Каждое измеренное калориметром значение энергосодержания сравнивалось с расчетным, которое вычислялось по формуле

$$E_{рас} = \gamma \int I_{пуч}(t) U_{пуч}(t) dt, \quad (5)$$

где $U_{пуч}(t)$, $I_{пуч}(t)$ — измеренные зависимости напряжения, ускоряющего атомы в ионно-оптической системе инжектора, и тока пучка от времени; γ — коэффициент перезарядки пучка в газовой мишени. Этот коэффициент принимался равным 0,8 при всех измерениях (значение 0,8 соответствует равновесной газовой мишени для частиц с энергией 17 кэВ) [4]. На рис. 5 графически показано сравнение измеренного энергосодержания пучка с расчетным. Точки, лежащие правее 500 Дж, относятся к измерениям без маг-

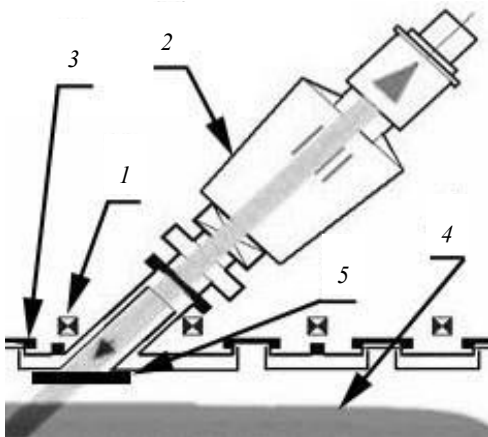


Рис. 4. Размещение калориметра: 1 — магнитная катушка; 2 — инжектор «Старт-3»; 3 — стенка вакуумной камеры ГДЛ; 4 — плазма; 5 — проволочный калориметр

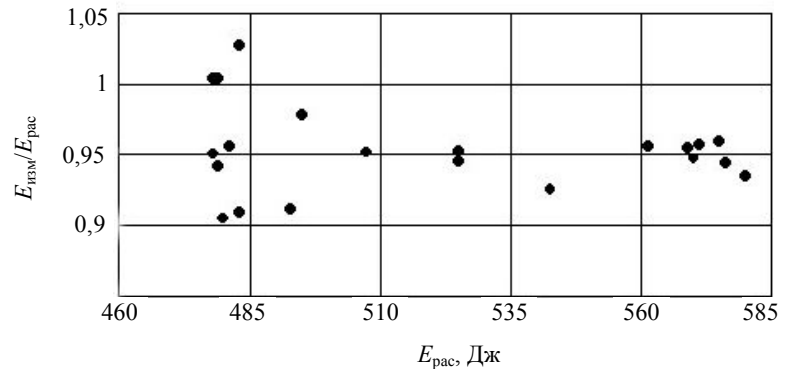


Рис. 5. Результаты измерения энергосодержания пучка: $E_{изм}$ — энергосодержание, измеренное проволочным калориметром; $E_{рас}$ — расчетное энергосодержание пучка

нитного поля, в это время на калориметр попадают как нейтральные, так и заряженные частицы пучка, поэтому поглощаемая проволокой энергия больше, чем в случае, когда заряженные частицы отклоняются магнитным полем установки. Точки левее 500 Дж получены в экспериментах, когда в установке привола плазма и, соответственно, было включено удерживающее ее магнитное поле. Большой разброс точек левее 500 Дж обусловлен не только ошибками измерения калориметром, но также ошибками определения расчетного энергосодержания пучка — коэффициент перезарядки γ в действительности не является константой, а зависит от стабильности работы газовой мишени и может меняться от выстрела к выстрелу.

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ КАЛОРИМЕТРОМ

Погрешность измерения проволочным калориметром складывается из погрешности определения энергии, поглощенной проволокой, по изменению ее сопротивления и ошибки вычисления энергосодержания пучка по известной поглощенной энергии. Разберем отдельно каждую из этих двух составляющих.

Погрешность вычисления поглощенной энергии определяется температурной зависимостью коэффициентов c и $\alpha\rho_0$, входящих в выражение (4), а также отклонением d от его среднего значения 0,05 мм.

При нагреве пучком температура проволок в эксперименте изменялась в пределах от комнатной (20 °С) до максимальной $T_{\text{макс}}$. Оценка максимальной температуры, полученная исходя из параметров, на которые спроектирован инжектор ($i_{\text{инж}} = 0,3 \text{ эк.А/см}^2$, $E_{\text{инж}} = 17 \text{ кэВ}$, $\tau_{\text{инж}} = 1,1 \text{ мс}$), дает значение

$$T_{\text{макс}} = 20^\circ + \frac{4E_{\text{инж}}i_{\text{инж}}\tau_{\text{инж}}}{\pi c\rho d} = 600^\circ \tag{6}$$

На графике (рис. 6) для вольфрама показано изменение отношения коэффициентов $F = c/\alpha\rho_0$, входящих в выражение (4), при изменении температуры. Из графика видно, что относительное изменение коэффициента F в диапазоне от 20 до 600 °С не превышает 2,5%.

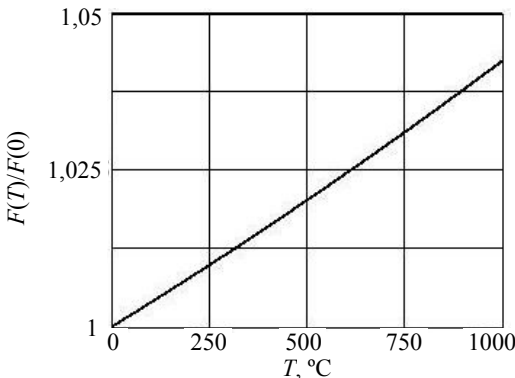


Рис. 6. Температурная зависимость коэффициентов

Паспортное значение отклонения диаметра проволоки от его среднего значения 0,05 мм — 1%. Соответственно относительная погрешность измерений метром оценивается в

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \left(4\frac{\Delta d}{d}\right)^2} = 5\% \tag{7}$$

Кроме этой погрешности, существует систематическая ошибка, вызванная занижением измеряемого гособдержания вследствие отражения некоторых частиц пучка от поверхности вольфрамовых проволок. Для оценки влияния этого эффекта будем считать вольфрамовую проволоку цилиндром диаметром d , а поток атомов водорода — моноэнергетическим с энергией $E = 17 \text{ кэВ}$ и не имеющим углового броса. Значение коэффициента отражения энергии в зависимости от угла падения возьмем согласно [5]

$$R_E(\phi) = 0,66 \exp\left\{-0,415 \sqrt{\frac{M_2}{(M_1 + M_2)} \frac{E[\text{эВ}]}{Z_1 Z_2 \sqrt{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}}}} \cos(\phi)\right\}, \tag{8}$$

где M_1 , M_2 , Z_1 и Z_2 — масса и заряд налетающей и мишенной частицы соответственно; ϕ — угол между направлением скорости частиц в пучке и нормалью к поверхности проволоочки. Тогда относительная величина энергии, уносимой отраженными от поверхности проволоочки частицами, для 17 кэВ:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\int_0^{\pi/2} R_E(\phi) \cos(\phi) d\phi}{\int_0^{\pi/2} \cos(\phi) d\phi} = 8\% \tag{9}$$

Зависимость этой величины от энергии частиц падающего пучка для вольфрамовой проволоки и плоскости приведена на рис. 7. На рисунке видно, что доля энергии, уносимая отраженными от проволоки частицами, больше, чем отраженными от плоскости, и что эта доля будет меньше при измерениях энергосодержания пучков с большей энергией частиц.

В действительности приведенная оценка даже завышена, так как коэффициент отражения энергии сильно зависит от наличия примесей на поверхности проволоки. И, как указывается в работе [5], наличие примесей легких элементов на поверхности материала, состоящего из тяжелых атомов, ведет к уменьшению среднего атомного номера материала мишени и влечет за собой уменьшение коэффициента отражения энергии.

На рис. 5 видно, что измеренные значения энергосодержания в среднем на 5% меньше расчетных значений. От этой систематической ошибки можно избавиться предварительной калибровкой калориметра с целью выяснения отражающих свойств его поверхности.

ВЫВОДЫ

Сконструирован и собран проволочный калориметр, имеющий высокую прозрачность, с помощью которого возможно измерение энергосодержания пучка с поглощением лишь незначительной доли его частиц (менее 1%). Относительная погрешность измерений калориметром оценена в 5%. Наблюдалось систематическое занижение измеряемого энергосодержания вследствие отражения частиц от поверхности проволочек. Проволочным калориметром произведена серия измерений энергосодержания пучка инжектора «Старт-3» на ГДЛ. Полученные результаты в пределах ошибки измерений совпадают с расчетным энергосодержанием пучка, что подтверждает работоспособность калориметра.

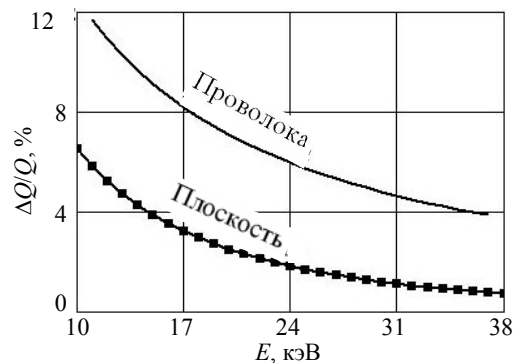


Рис. 7. Отражение в зависимости от энергии падающих частиц



Сергей Викторович Мурахтин, старший н.с., кандидат ф.-м.н., лауреат премии СО РАН им. Г.И. Будкера в области физики плазмы и УТС за цикл работ



Андрей Владимирович Киреевко, аспирант ИЯФ СО РАН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mirnov V.V., Ryutov D.D.** — Sov. Techn. Phys. Lett., 1979, vol. 5, p. 279.
2. **Физические величины.** Справочник. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991, с. 200.
3. **Росляков Г.В.** Ионные и атомарные пучки для нагрева и диагностики плазмы. Дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1987. 275 с.
4. **Багрянский П.А., Бочаров В.Н., Дейчули П.П., Иванов А.А., Карпушов А.Н., Максимов В.В., Рогозин А.И., Саликова Т.В.** Диагностический комплекс установки ГДЛ для изучения нагрева плазмы при инъекции мощных атомарных пучков: Препринт 93-70 ИЯФ СО АН СССР. — Новосибирск, 1993.
5. **Курнаев В.А., Машкова Е.С., Молчанов В.А.** Отражение легких ионов от поверхности твердого тела. — М.: Энергоатомиздат, 1985. 85 с.

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2007 г.
 Вопросы атомной науки и техники.
 Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 1, с. 26—30.