

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕДПРОГРЕВА ЛАЗЕРНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

С.В. Авдеева, М.П. Калашников, В.К. Ляпидевский, Ю.А. Михайлов, В.А. Прорвич, А.В. Роде,
А.В. Сартори, Г.В. Склизков, С.И. Федотов

Описана методика исследования электронного предпрогрева оболочечных термоядерных мишеней на основе регистрации излучения быстрых электронов при их торможении в плотной плазме.

При оптимизации процесса сжатия термоядерных оболочечных мишеней под действием лазерного излучения одним из гидродинамических параметров, который необходимо учитывать, является уровень предварительного прогрева мишени быстрыми электронами. Это связано с тем, что наиболее эффективным для достижения требуемой плотности термоядерного горючего является режим сжатия без дополнительного разогрева как самого термоядерного топлива, так и оболочки-поршня /1/.

В настоящей работе описан метод оценки температуры электронного предпрогрева оболочки на основе измерения излучения быстрых электронов, тормозящихся в плотной плазме, в экспериментах по нагреву и сжатию оболочечных мишеней на лазерной термоядерной установке "Дельфин-1" /2/. Метод основан на предположении, что основной вклад в предпрогрев сжимающейся оболочки вносят электроны, имеющие вполне определенный и достаточно узкий диапазон энергий $(E_{fe}^{min}, E_{fe}^{max})$, зависящий от условий облучения и начальной толщины оболочки. Электроны с энергией $E_{fe} < E_{fe}^{min}$ поглощаются в области плазмы с плотностью ниже плотности неиспаренной части сжимающейся оболочки и не прогревают ее в процессе сжатия. Высокоэнергетичные электроны $E_{fe} > E_{fe}^{max}$ проникают сквозь оболочку практически не поглощаясь и не передавая ей своей энергии. Таким образом, измерения абсолютной интенсивности и температуры излучения быстрых электронов с энергией $E_{fe}^{min} < E_{fe} < E_{fe}^{max}$ дают информацию о величине предпрогрева оболочечной мишени.

Рассмотрим условия поглощения энергии быстрых электронов в плотной плазме. Для простоты оценок можно считать, что быстрые электроны поглощаются в основном в двойной толщине оболочки. Величину $\rho \Delta R$ при вычислении поглощения заменим усредненным значением за время сжатия мишени $\bar{\rho} \Delta R$, которое, как показывают гидродинамические расчеты, близко к $2\rho_0 \Delta R_0 / 3$ /3/. Будем также считать, что поглощение электронов не зависит от температуры плазмы. Это справедливо в случае, когда $E_{fe} \gg I$, где I — потенциал ионизации плазмы, в рассматриваемых условиях $E_{fe} \sim 10$ кэВ и $I \sim 10$ эВ такое предположение заведомо выполняется.

В рамках всех перечисленных допущений длина свободного пробега электрона в плазме стеклянной оболочечной мишени аппроксимируется зависимостью /4/

$$l \approx 1,0 \cdot 10^{-2} E_{fe}^{-1,9},$$

где l в мкм, E_{fe} в кэВ. Доля энергии, оставленная моноэнергетическим электроном в оболочке с толщиной ΔR ,

$$\Delta E_{fe} \approx E_{fe} - [(10^{-2} E_{fe}^{-1,9} - \Delta R) / 10^{-2}]^{0,53}.$$

Для электронов с максвелловским распределением по энергиям и с температурой спектра kT_h суммарная энергия, оставленная в оболочке, записывается в виде

$$\epsilon = \int_{E_{min}}^{E_{max}} (E_{fe} - [(10^{-2} E_{fe}^{-1,9} - \Delta R) / 10^{-2}]^{0,53}) \sqrt{E_{fe}} \exp(-E_{fe} / kT_h) dE_{fe}.$$

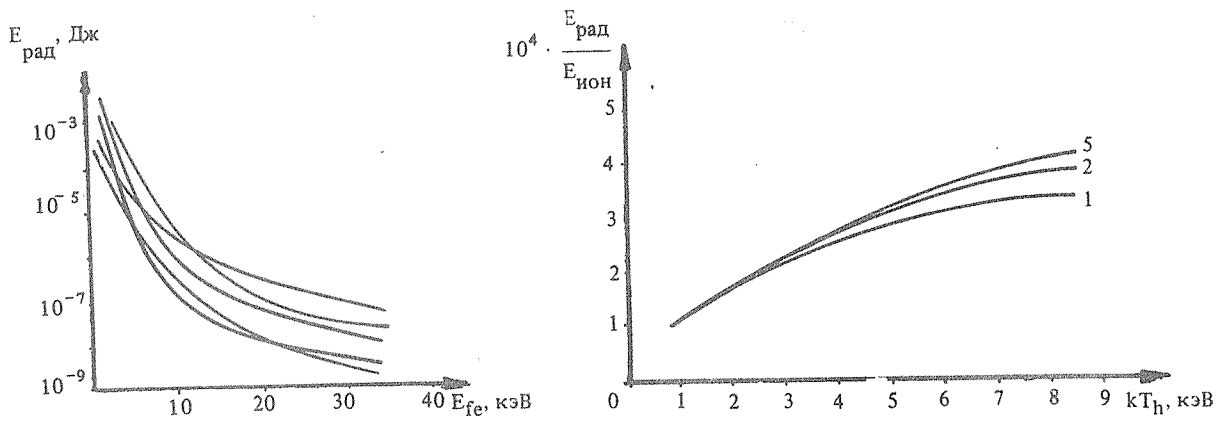


Рис. 1. Кривые ослабления жесткого рентгеновского излучения плазмы в различных экспериментах по сжатию мишеней на лазерной установке "Дельфин-1".

Рис. 2. Отношение радиационных и ионизационных потерь в зависимости от температуры kT_h .

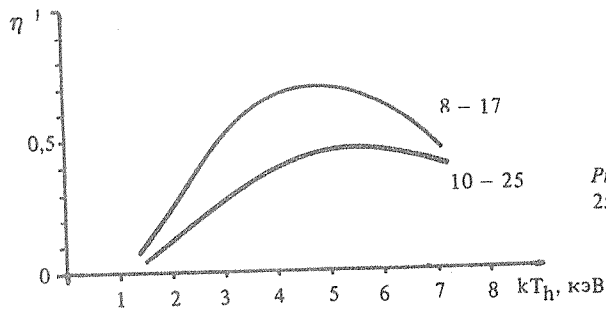


Рис. 3. Доля энергии излучения в диапазонах (8 - 17) кэВ и (10 - 25) кэВ от полной энергии в зависимости от температуры.

Интервал (E_{fe}^{min} , E_{fe}^{max}) определяется из экспериментальных условий. На установке "Дельфин-1" он составляет 8 - 17 кэВ для $\rho_0 \Delta R_0 = 0,2$ мг/см² и 10 - 25 кэВ для $\rho_0 \Delta R_0 = 1$ мг/см².

Для определения ϵ по измерению интенсивности излучения электронов $E_{h\nu}$ необходимо определить отношение радиационных и ионизационных потерь энергии электрона $E_{рад}/E_{ион}$ и долю энергии излучения η в спектральном диапазоне ($E_{h\nu}^{min}$, $E_{h\nu}^{max}$), зависящую как от температуры спектрального распределения, так и от толщины оболочки: $\epsilon = E_{h\nu} (E_{ион}/E_{рад}) \eta$. При этом для удобства расчетов можно полагать $E_{h\nu}^{min} = E_{fe}^{min}$, $E_{h\nu}^{max} = E_{fe}^{max}$.

Температура kT_h и интенсивность рентгеновского излучения $E_{h\nu}$ в заданном спектральном диапазоне определены с помощью 16-канального спектрометра [5]. На рис. 1 представлены характерные кривые ослабления жесткого рентгеновского излучения, полученные в экспериментах на установке "Дельфин-1". Полную энергию рентгеновского излучения в заданном спектральном диапазоне можно определить по кривой ослабления, продолжая ее до пересечения с осью ординат. При этом угол наклона дает значение температуры. Соотношение радиационных и ионизационных потерь для моноэнергетического электрона аппроксимируется следующим выражением [6]:

$$E_{рад}/E_{ион} = 6,1 \cdot 10^{-5} E_{fe}^{0,7},$$

где E_{fe} в кэВ. Результат расчета энергии в зависимости от температуры спектра kT_h для $\Delta R_0 = 1, 2$ и 5 мкм представлен на рис. 2. Доли энергии η для диапазонов ($E_{h\nu}^{min}$, $E_{h\nu}^{max}$) = (8, 17) кэВ и (10, 25) кэВ приведены на рис. 3.

Разработанная методика измерения электронного предпрогрева, основанная на анализе жесткой компоненты спектра рентгеновского излучения, позволила оценить уровень электронного предпрогрева оболочечных мишеней в экспериментах на установке "Дельфин-1". Установлено, что температура электронного предпрогрева зависит от начальной толщины оболочки и лежит в интервале от 3 до 50 эВ, что позволяет сделать вывод о реализации низкоэнтропийного режима сжатия высокоаспектных оболочечных мишеней в рассматриваемых экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю. В. и др. Труды ФИАН, т. 134, 3, М., Наука, 1982;
Кеу М. Н. In: Radiation in plasmas, ed. by B. McNamara, Review from 1983 College on Plasma Physics, 1984, Trieste, Italy, v. 1, p. 458.
2. Басов Н. Г., Михайлов Ю. А., Склизков Г. В., Федотов С. И. Лазерные термоядерные установки. М., ВИНТИ, 1984, т. 25, ч. 1, 2, с. 368.
3. Ahlborn B., Keu M. N., Bell A. R. Phys. Fluids, v. 25, 541 (1982).
4. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. Киев, Наукова Думка, 1975.
5. Калашников М. П. и др. Препринт ФИАН № 26, М., 1984.
6. Баранов П. С. и др. Труды ФИАН, т. 135, М., Наука, 1983.

Поступила в редакцию 15 октября 1987 г.