

ВЫХОД ТЕРМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ ИЗ ПЛАЗМЫ, СЖИМАЕМОЙ ОБОЛОЧКОЙ

*С.Л. Боголюбский, Б.П. Герасимов, В.И. Ликсонов,
А.П. Михайлов, Ю.П. Попов, Л.И. Рудаков,
А.А. Самарский, В.П. Смирнов*

Полиэтиленовый поршень толщиной 10 мм, разогнанный с помощью РЭП до скорости $(5 \div 7) \cdot 10^6$ см/сек сжал дейтериевую плазму в свинцовом конусе в тысячу раз до плотности 10^{22} см⁻³ и нагрел ее до температуры 1 кэв. В соответствии с расчетом зарегистрированы термоядерные нейтроны в количестве $(1 \div 3) \cdot 10^6$ за импульс.

В связи с развитием техники получения сверхмощных импульсов света от лазеров и РЭП изучаются способы поджига термоядерной реакции с помощью сжатия ДТ смеси оболочкой, разогнанной до большой скорости. Потери тепла из плазмы из-за электронной теплопроводности

и тормозного излучения препятствуют нагреву при сжатии. Для выбранной температуры T потери минимальны при определенном значении произведения концентрации плазмы на ее размер:

$$\sum_{\alpha} Z_{\alpha}^2 n_{\alpha} r (\text{см}^{-2}) \approx 10^{21} T^{3/2} \text{ кэв} \quad (1)$$

Z_{α} — эффективный заряд ионов концентрации n_{α} . При выполнении этого условия плазму можно нагреть до выбранной температуры, сжимая ее оболочкой, движущейся со скоростью:

$$v (\text{см/сек}) \geq 3 \cdot 10^6 T \text{ кэв}. \quad (2)$$

В нашей предыдущей публикации было сообщено, что в диодах сильно-точных ускорителей РЭП, благодаря действию собственных магнитных и электрических полей пучка удается достигнуть энерговклада в тонкие анодные фольги на уровне 1 кэв на атом. Эксперимент и расчеты показали, что в этих условиях лучистая теплопроводность выводит из золотой фольги, толщиной 5 мкм, в виде тепла 30 ± 50% от энергии, оставленной пучком в фольге. В опытах, где полость за анодной фольгой закрывалась полиэтиленовой пленкой, толщиной 10 мкм, половина потока тепла шла на нагрев внутренней поверхности и ускорение этой пленки. В соответствии с расчетом были зарегистрированы скорости $(5 \div 7) \times 10^6$ см/сек.

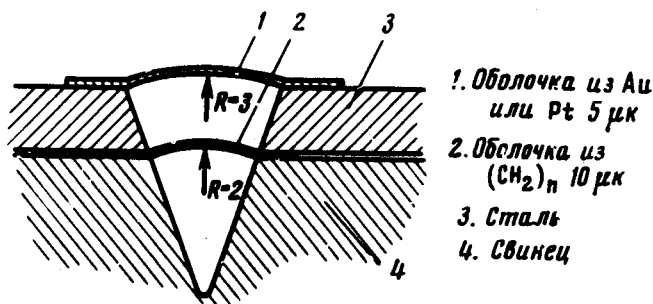


Рис. 1

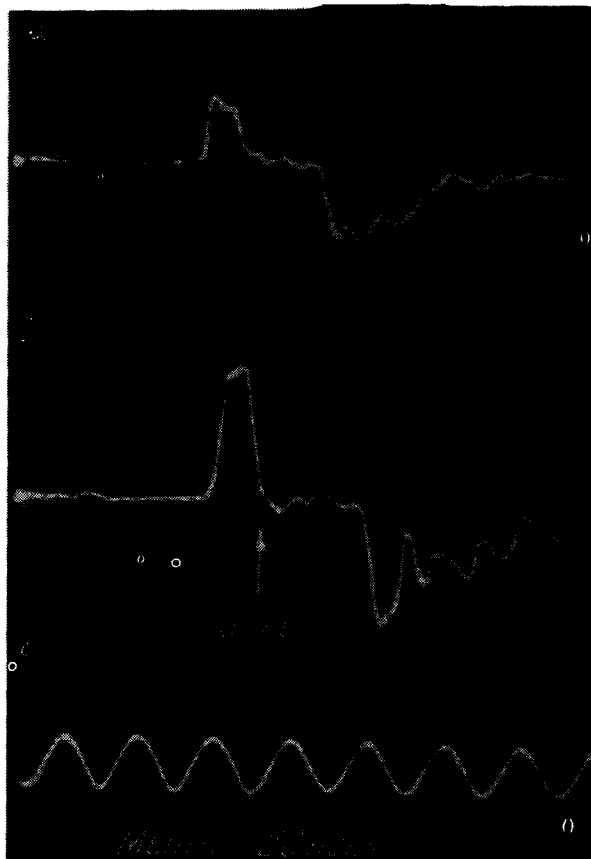
Эти результаты побудили нас поставить эксперименты по сжатию дейтериевой плазмы. При таких скоростях "поршня" можно было ожидать достижения температуры $(1 \div 2)$ кэв и заметного нейтронного выхода. Длительность теплового импульса τ , из расчетов, составляла $(10 \div 20)$ нсек. Для эффективного использования тепла радиус оболочки должен быть больше $3v\tau$, что в наших условиях 2 мм.

Согласно расчетам и измерениям энергия РЭП установки "Тритон" 1,5 кдж в импульсе 30 нсек хватало для разгона полиэтиленовой фольги (толщина 10 мкм, диаметр 2 мм), до энергии 25 – 35 дж. Поэтому фольга, представляющая из себя часть сферической поверхности с радиусом 2 мм вгонялась в конус с углом раствора 60°, выдавленным в свинце. По нашему мнению, это достаточно хорошо моделирует сферическое сжатие, пока свинец держит давление сжимаемой плазмы. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Для достижения температуры $1,5 \div 2$ кэв надо сжать плазму примерно в 1000 раз. Энергии поршня достаточно для нагрева $3 \cdot 10^{16}$ атомов дейтерия, что соответствует

начальной плотности 10^{19} см^{-3} . Это в десять раз меньше, чем требуется согласно соотношению (1) при тысячекратном сжатии. Поэтому мы добавляли в дейтерий $7 \div 10\%$ аргона.

Для регистрации нейтронов использовались активационный серебряный и пропорциональный гелиевый счетчики.

Выход нейтронов сильно зависел от начального давления дейтерия и состава смеси. Максимальный выход составлял $(1 \div 3) \cdot 10^6$ нейтронов за импульс и соответствовал давлению 150 тор при 7% аргона. Это находится в соответствии с результатами одномерного численного моделирования. Стенки конуса в расчетах учитывались введением поправочного множителя в коэффициент теплопроводности. Потери на прогрев боковых стенок в пространстве между фольгами учитывались искусственным занижением показателя адиабаты для полиэтилена ($\gamma = 1, 2$). Стабильность измеренного выхода нейтронов, несмотря на сильную зависимость $\langle \nu \sigma \rangle$ от T , можно объяснить расpirанием головки конуса. Оно наблюдалось экспериментально и соответствовало тысячекратному сжатию и давлению $(3 \div 5) \cdot 10^7 \text{ атм}$.



На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов с двух сцинтилляционных детекторов, расположенных на расстоянии 1 и $1,6 \text{ м}$ от мишени. В качестве опорного импульса на осциллографы заводился одновременно сигнал с ФЭКа, регистрирующего тормозное рентгеновское излучение с мишени (положительный сигнал). Для подавления рентгеновского из-

лучения сцинтилляционные детекторы нейтронов помещались в свинцовые оболочки толщиной 11 см. Время задержки сигналов на втором детекторе относительно первого составляет 25 нсек, что соответствует энергии термоядерного нейтрона $2,4 \pm 0,5$ Мэв. Зная энергию нейтронов, можно определить момент их рождения. На осциллограмме он отмечен стрелкой. В этом опыте нейтроны возникали через 37 нсек после возникновения рентгеновского излучения, когда напряжение на диоде существенно снизилось. Этим осциллограммам соответствует расчет с энерговкладом 1 кдж.

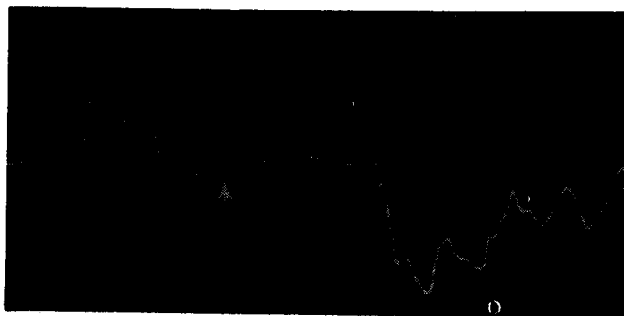
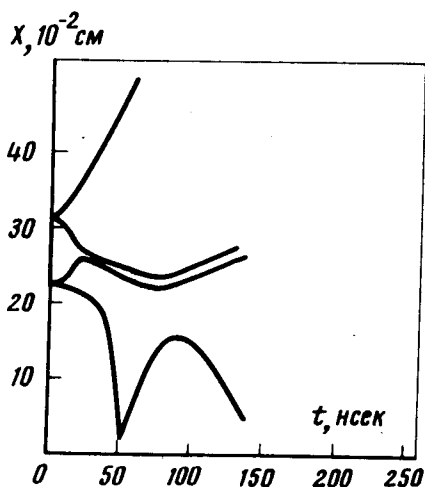


Рис. 3

На рис. 3 приведена расчетная $\gamma - t$ диаграмма процесса при энерговкладе в золотую фольгу 600 дж. Этому расчету соответствует приведенный ниже сигнал с дальнего нейтронного датчика. В этом эксперименте нейтроны возникли через 20 – 25 нсек после окончания импульса тормозного рентгеновского излучения.

В заключение приносим благодарность Э.З.Тарумову, А.Н.Рулеву, С.С.Кингсепу, В.И.Сень за разработку и предоставление гелиевых счетчиков, Е.И.Баранчикову, В.П.Бочину за изготовление мишеней, Г.Е.Шаталову, Е.И.Цыганкову за нейтронно-физические расчеты, С.П.Загородникову и Л.И.Уруцкоеву за большую помощь в проведении экспериментов.