

атом золота и позволяет осуществить моделирование нагрева термоядерных мишеней.

В заключение авторы благодарят Е.К.Завойского за обсуждение и советы в процессе выполнения работы, Е.И.Баранчикова, А.С.Черненко, С.П.Загородникова за помощь в проведении эксперимента, Б.В.Алексеева и В.И.Иванова за численное исследование взаимодействия электронов с фольгой.

Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию  
1 июля 1976 г.

### Литература

- [1] В.И.Ликсонов, Ю.Л.Сидоров, В.П.Смирнов. Письма в ЖЭТФ, 19, 516, 1974.
- [2] Ю.В.Коба, В.И.Ликсонов, В.С.Пенькина, Л.И.Рудаков, Ю.Л.Сидоров, В.П.Смирнов, А.Д.Сухэв, Э.З.Тарумов. V конференция МАГАТЭ по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Токио, 1974.
- [3] М.Д.Клаузер и др. VII Европейская конференция по термоядерному синтезу и физике плазмы, I, 85, 1975.
- [4] Д.Д.Рютов, Г.В.Ступаков. Физика плазмы, 4, 1976.

Письма в ЖЭТФ, том 24, вып. 4, стр. 206 – 209

20 августа 1976 г.

## 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 мкм, 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<sup>-3</sup> 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:

$$\sum_a Z_a^2 n_a r (\text{см}^{-2}) \approx 10^{21} T^{3/2} \text{ кэв} \quad (1)$$

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

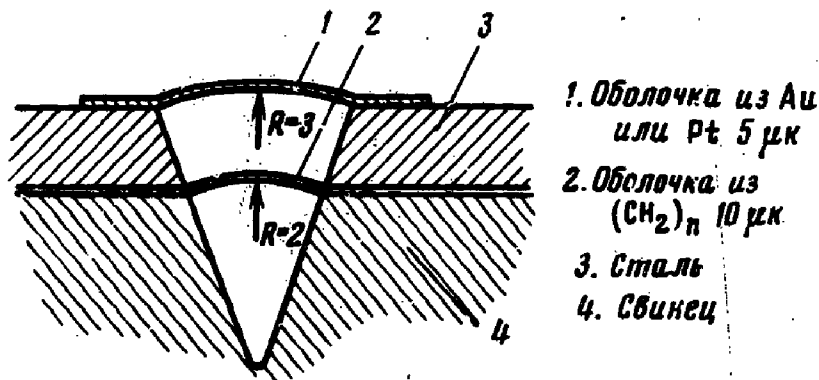


Рис. 1

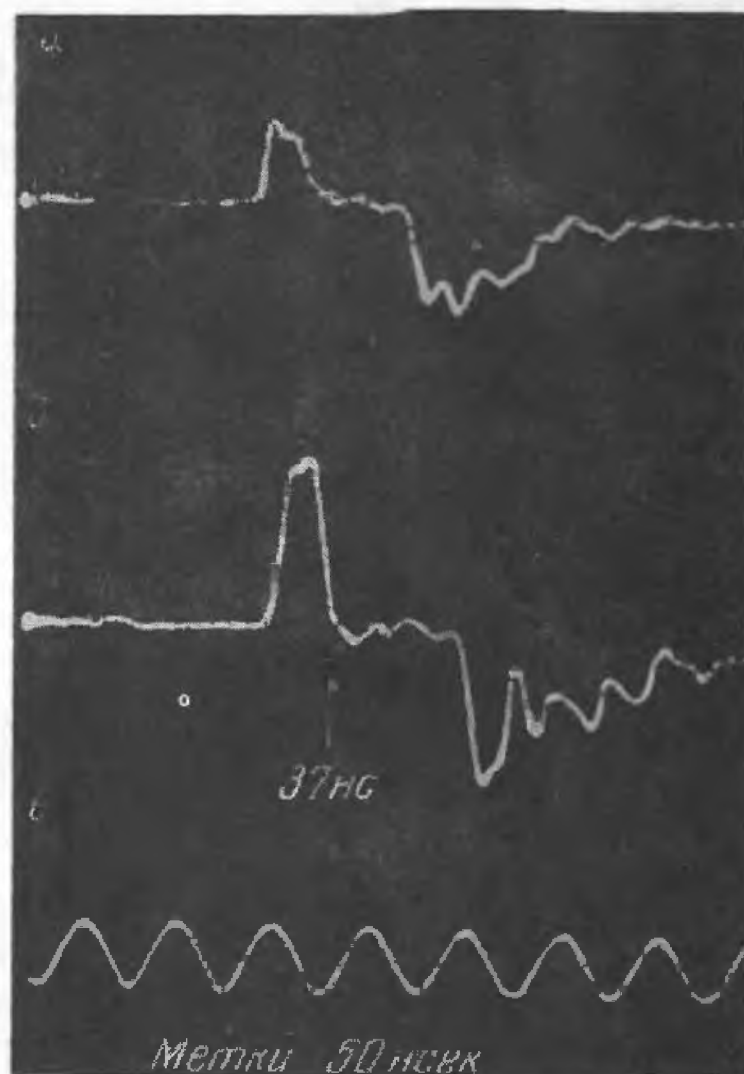
Эти результаты побудили нас поставить эксперименты по сжатию дейтериевой плазмы. При таких скоростях "поршня" можно было ожидать достижения температуры  $(1 \div 2) \text{ кэв}$  и заметного нейтронного выхода. Длительность теплового импульса  $\tau$ , из расчетов, составляла  $(10 \div 20) \text{ нсек}$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

Согласно расчетам и измерениям энергия РЭП установки "Тритон"  $1,5 \text{ кдж}$  в импульсе  $30 \text{ нсек}$  хватало для разгона полиэтиленовой фольги (толщина  $10 \text{ мкм}$ , диаметр  $2 \text{ мм}$ ), до энергии  $25 - 35 \text{ дж}$ . Поэтому фольга, представляющая из себя часть сферической поверхности с радиусом  $2 \text{ мм}$  вгонялась в конус с углом раствора  $60^\circ$ , 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  $1,5 \div 2 \text{ кэв}$  надо сжать плазму примерно в  $1000$  раз. Энергии поршня достаточно для нагрева  $3 \cdot 10^{16}$  атомов дейтерия, что соответствует

начальной плотности  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . 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  $150 \text{ тор}$  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  $\langle \sigma \rangle$  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 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.

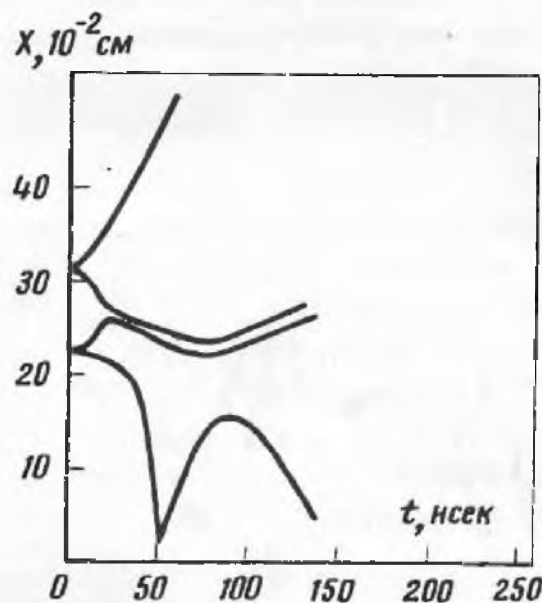


Рис. 3

На рис. 3 приведена расчетная  $r - t$  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.