

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИОСНОВАН В 1965 ГОДУ
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОДТОМ 67, ВЫПУСК 3
10 ФЕВРАЛЯ, 1998

Письма в ЖЭТФ, том 67, вып.3, стр.161 - 165

© 1998г. 10 февраля

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ
АСИММЕТРИИ ОБОЛОЧКИ НА РАБОТУ МИШЕНИ НА
УСТАНОВКЕ "ИСКРА-5"С.А.Бельков, А.В.Бессараб, О.А.Винокуров, В.А.Гайдаш, Н.В.Жидков,
В.М.Изгородин, Г.А.Кириллов, Г.Г.Кочемасов, А.В.Кунин, Д.Н.Литвин,
В.М.Муругов, Л.С.Мхитарьян, С.И.Петров, А.В.Пинегин, В.Т.Пунин,
Н.А.Суслов, В.А.ТокаревРоссийский федеральный центр "Всероссийский НИИ экспериментальной физики"
607190 Саров, Нижегородская обл., Россия

Поступила в редакцию 5 января 1998 г.

На лазерной термоядерной установке "Искра-5" проведены эксперименты по исследованию влияния контролируемой крупномасштабной асимметрии оболочки, содержащей дейтерий-тритиевое топливо, на ее сжатие и генерацию нейтронов при прямом (рентгеновском) воздействии. Однородность рентгеновского излучения в окрестности мишени в экспериментах оценивалась на уровне не хуже 3%, в то время как асимметрия оболочки варьировалась от 30 до 100%. Наблюдаемое снижение экспериментального нейтронного выхода по сравнению с опытами с симметричными мишенями удовлетворительно согласуется с двумерными расчетами.

PACS: 52.58.Ns

Проведенные на лазерной установке "Искра-5" эксперименты по сжатию и нагреву дейтерий-тритиевого топлива (DT) рентгеновским излучением, генерируемым внутри сферической полости – конвертора, показали высокую стабильность работы мишени и воспроизводимость получаемых результатов [1–3] (см. также ниже таблицу). Происходящее в полости многократное переотражение лазерного и рентгеновского излучений приводит к симметризации рентгеновского потока, падающего на центральную капсулу с DT газом, особенно заметной в условиях, когда диаметр капсулы \varnothing_{sh} существенно меньше диаметра \varnothing_{box} конвертора. Расчетные оценки показывают, что характерная степень неоднородности облучения при $\varnothing_{sh}/\varnothing_{box} = 0.14$ составляет $\cong 3\%$ [2], что подтверждается экспериментально высокой симметрией свечения сжатой стеклянной капсулы в собственном рентгеновском излучении, регистрируемом с помощью камеры-обскуры. Косвенным доказательством сравнительно высокой симметрии является совпадение расчетного и экспериментального

нейтронного выходов при изменении расчетного объемного сжатия (на момент генерации нейтронов) от $\cong 10^2$ до $2 \cdot 10^3$ [2].

Достигнутые результаты стимулировали постановку экспериментов с контролируемой асимметрией оболочек, содержащих DT топливо. Асимметрия реализуется путем нанесения на одну из половин поверхности сферы дополнительного слоя вещества (см. рис.1). Основным вопросом, который ставился перед экспериментом, заключался в определении величины асимметрии, при которой экспериментальный нейтронный выход будет резко отличаться от полученного в одномерном расчете, а также в эксперименте со сферически симметричной оболочкой, имеющей ту же массу, что и асимметричная. Кроме того, было интересно определить экспериментально степень деформации нагретой и сжатой капсулы по изображению, получаемому с помощью камеры-обскуры. Ниже представлены экспериментальные данные, полученные в серии из 7 опытов.

Мишень состояла из медного тонкостенного сферического корпуса диаметром 2 мм с шестью отверстиями диаметром 0.4–0.6 мм для ввода лазерных пучков, аналогичного мишени МОК [4], внутренняя поверхность которого покрыта слоем золота толщиной около 1 мкм, а внешняя – висмутом толщиной 0.1–0.3 мкм. В центре расположена стеклянная микросфера, наполненная газообразной DT смесью с давлением P_{DT} . Для получения толщины микросферы свыше 7 мкм использовались специальные технологии осаждения на ее поверхность различных веществ, таких как полипараксилилен (СН), магний или аналог стекла (SiO_2).

Мишень облучалась 12 лазерными пучками ($\lambda = 1.315$ мкм) длительностью $0.35 \pm \pm 0.05$ нс при общей энергии, вводимой в камеру взаимодействия, 5.5–7 кДж (мощность 15–20 ТВт). Использовался комплекс диагностической аппаратуры [3], в который входят рентгеновские, корпускулярные (нейтронные) и оптические методики.

Основные результаты экспериментов представлены в таблице¹.

Параметры асимметричных капсул и основные экспериментальные результаты

№ опыта	Параметры капсулы					Результаты эксперимента					
	D_h , мм	\varnothing_{sh} , мкм	d_{sh} , мкм	dl , мкм	P_{DT} , атм	E_L , кДж	N , 10^9	T , кэВ	\varnothing_{min} , мкм	$\tau_{\gamma\gamma}$, нс	
1	0.6	270	4.9	5	7	8.6	0.77	2.3	–	0.45	
2	0.6	273	5.1	9.5	8	9.0	0.77	1.7	–	–	
3	0.6	290	5.1	10.5	7.5	7.2	2.8	2.0	70	0.4	
4	0.4	272	7.1	10.5	16	8.4	3.8	1.8	60	0.48	
5	0.4	301	9.4	10.5	12	8.4	2.7	1.9	78 × 64	0.55	
6	0.4	287	16	18	20	8.5	0.1	–	–	–	
7	0.4	301	10	10 ⁺ 11.5	14	8.3	0.55	–	55	–	

Интегральный нейтронный выход измерялся с помощью комплекса методик, основанных на активации меди и индия, а также методом затянутой регистрации. Спектр нейтронов, а затем и температуры ионов DT определялись по времяпролетной методике, имеющей два канала с пролетными базами $L_1 = 1249$ см и

¹) D_h – диаметр отверстий ввода лазерного излучения; \varnothing_{sh} , d_{sh} – диаметр стеклянной микросферы и ее толщина; dl – толщина магниевого покрытия; P_{DT} – давление DT газа; E_L – энергия лазерного излучения, введения в камеру взаимодействия; N – нейтронный выход; T_{DT} – температура DT топлива; \varnothing_{min} – диаметр сжатой области по обскурোগрамме; $\tau_{\gamma\gamma}$ – время сжатия оболочки (интервал между рентгеновскими импульсами, генерируемый на стенке кожуа и при схлопывании оболочки). В опыте, отмеченном звездочкой, мишень имела двухстороннюю симметрию.

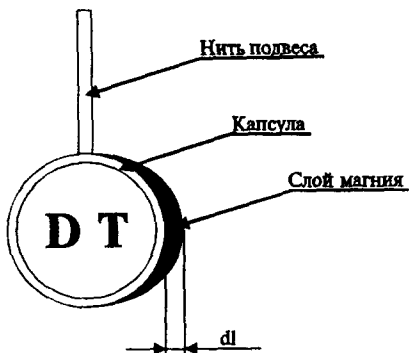


Рис.1. Схема асимметричной капсулы

$L_2 = 1676$ см. Интервал времени $\tau_{\gamma\gamma}$ между началами рентгеновских импульсов, генерируемых на поверхности кожуха (во время воздействия лазерного излучения) и при схлопывании капсулы с DT газом, определялся путем регистрации рентгеновского излучения с помощью рентгеновского фотохронографа, работающего с пространственным разрешением в определенном спектральном интервале ($h\nu \cong 2.5$ кэВ). Сигналы, отвечающие двум указанным импульсам, регистрировались сквозь различные отверстия для ввода (см. рис.2). Диаметр сжатого ядра определялся с помощью камеры-обскуры. На изображениях свечения сжатого ядра видна некоторая субструктура, хотя заметная асимметрия формы наблюдалась только в опыте №4. Результаты измерений спектральных потоков рентгеновского излучения, выходящего из кожуха, свидетельствуют о том, что эффективная температура мягкого ($h\nu \leq 1.5$ кэВ) рентгеновского излучения в условиях проведенных экспериментов составляет $T_{eff} \sim 160 \pm 15$ эВ [5].

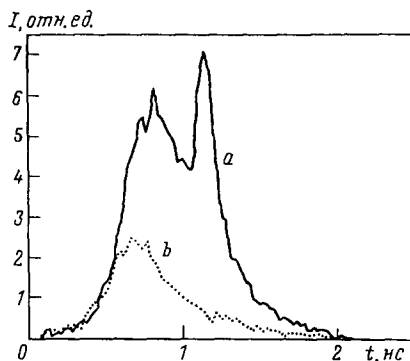
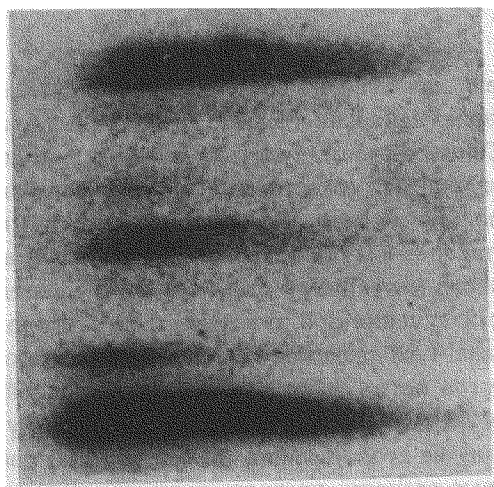


Рис.2. РЭОПрограмма (слева) и пропись двух сечений (справа) опыта №3

Полученные результаты по нейтронному выходу N можно систематизировать с помощью обобщения скейлинга, хорошо зарегистрировавшего себя в случае сфери-

чески симметричных оболочек с DT газом (рис.3):

$$N \sim m^{4/3} M^{2/3} f(E_\gamma/M_S). \quad (1)$$

Здесь m – масса DT газа, M и M_S – массы оболочки и ее симметричной части (без слоя магния), E_γ – энергия рентгеновского излучения в полости (на рис.3 величина E_γ приведена с учетом модельной оценки потерь энергии на быстрые ионы). Рисунок дополнен данными экспериментов по сферическим оболочкам. Видно, что при $E_\gamma/M_S \geq 1.5$ (условные единицы) нейтронный выход практически (с точностью до двойки) не зависит от величины E_γ/M_S , что соответствует режиму полностью прогреваемой оболочки. Для сферически симметричных оболочек диаметром ~ 280 мкм прогреваемая толщина оказывается равной ~ 7 мкм. Все оболочки с $E_\gamma/M_S \geq 1.5$ характеризуются одинаковым удельным энерговыделением, соответствующим нагреву оболочки до температуры ~ 160 эВ. При $E_\gamma/M_S < 1.5$ реализуется абляционный режим работы, удельный энерговыделен и нормированный нейтронный выход уменьшаются.

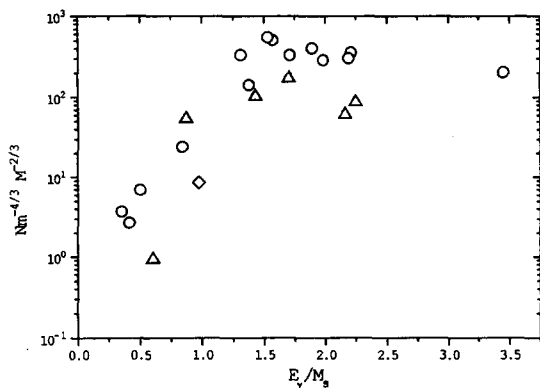


Рис.3. Зависимость нормированного нейтронного выхода от удельного энерговыделения в экспериментах с симметричными (о) и асимметричными (Δ – односторонняя асимметрия, ◇ – двухсторонняя асимметрия) центральными капсулами

Видно также, что асимметричные мишени качественно ведут себя подобно симметричным, уступая по абсолютному значению нейтронного выхода в ~ 2 раза при $E_\gamma/M_S \geq 1.5$ и ~ 4 раза при $E_\gamma/M_S \sim 0.5$. Таким образом, чувствительность к асимметрии ниже в режиме взрывающейся оболочки, что естественно. Причину слабой чувствительности можно объяснить следующим образом. Эффективный телесный угол, занимаемый слоем Mg покрытия, составляет $\sim 1/4$ от полного телесного угла. В опытах №1–3 толщина стекла ~ 5 мкм, и оно (с открытой стороны) прогревается полностью. Запаса энергии рентгеновского излучения при этом достаточно, чтобы прогреть изнутри еще $\sim (1.5 - 2)$ мкм стекла, находящегося под слоем Mg. В итоге, с непокрытой Mg стороны мишени внутрь летит часть оболочки с толщиной, примерно равной половине ее толщины (~ 2.5 мкм), для покрытой – соответствующая величина составляет ~ 2 мкм. Разница не столь велика, чтобы существенно уменьшить количество нейтронов. Двумерные расчеты, проведенные по программе "МИМОЗА" в предположении равномерного разогрева, показали, что в соответствии с экспериментом, примерно двукратное снижение выхода нейтронов.

С развитыми представлениями согласуются и данные о времени схлопывания $\tau_{\gamma\gamma}$ (рис.4). Видно (хотя и менее отчетливо из-за меньшей точности ± 0.05 нс определения

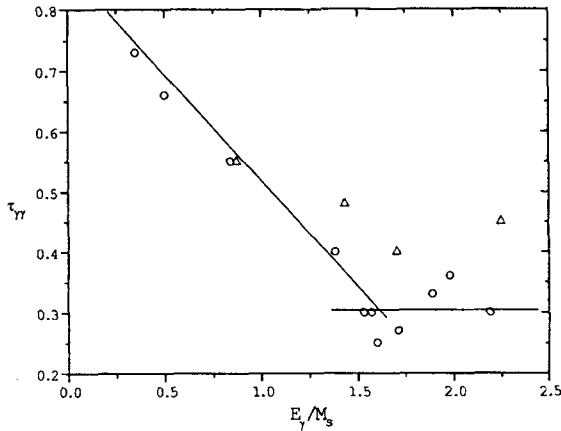


Рис.4. Зависимость времени схлопывания $\tau_{\gamma\gamma}$ от удельного энерговклада в экспериментах с симметричными (o) и асимметричными (Δ) центральными капсулами

$\tau_{\gamma\gamma}$), что при $E_\gamma/M_S \geq 1.5$ величина $\tau_{\gamma\gamma} \sim 0.3 - 0.4$ нс для симметричных и $\tau_{\gamma\gamma} \sim 0.4 - 0.45$ нс для асимметричных оболочек. При $E_\gamma/M_S \leq 1.5$ время $\tau_{\gamma\gamma}$ возрастает. По величине $\tau_{\gamma\gamma}$ можно оценить и скорость схождения границы газ-стекло, которая составляет $V \sim (1.5 - 3.5) \cdot 10^7$ см/с, что согласуется с результатами одномерных расчетов [2].

Таким образом, на установке "Искра-5" проведены успешные эксперименты по исследованию работы асимметричных оболочек при уровне асимметрии облучения $\leq 3\%$. Показано, что при асимметрии оболочек $\sim 50\%$ снижение нейронного выхода по сравнению с симметричным случаем составляет $\sim (2 - 4)$, что дает информацию о механизмах и степени прогрева оболочек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкомитета РФ по науке и технологиям на лазерной термоядерной установке "Искра-5" (регистрационный номер 01-50).

-
1. Ф.М.Абзаев, В.И.Анненков, В.Г.Безуглов и др., Письма в ЖЭТФ **58**, 28 (1993).
 2. G.G.Kochemasov, in *Proceedings of the 23rd European Conference*, St. John's College, Oxford, 19-23 September 1994, Institute of Physics Series Number **140** 17 (1995).
 3. Ф.М.Абзаев, А.В.Бессараб, Г.А.Кириллов и др., ВАНТ, серия: Математическое моделирование физических процессов, вып.4, 68 (1992).
 4. А.В.Бессараб, В.А.Гайдаш, Г.В.Долголева и др., ЖЭТФ **102**, 1800 (1992).
 5. А.В.Бессараб, С.Г.Гаранин, Г.А.Кириллов и др., В сб. *Тез. Докл. 9-го совещания по диагностике высокотемпературной плазмы*, Санкт-Петербург, Россия 2-4июня 1997.