

УДК 533.9

## ВОЛНА ТЕРМОЯДЕРНОГО ГОРЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ОБОЛОЧКОЙ ИЗ УРАНА-238

А. Г. Аксенов, М. М. Баско, Д. Г. Кошкарев, Е. А. Забродина, М. Д. Чуразов  
(ИТЭФ, г. Москва)

Для волны термоядерного горения дейтерия в цилиндрическом канале с урановой ( $^{238}\text{U}$ ) оболочкой исследуется возможность сокращения рабочего параметра  $\rho R$  (с 10 до  $3 \text{ г/см}^2$ ).

### Введение

В работе рассматривается комплекс расчетно-теоретических оценок процесса распространения волны термоядерного горения дейтерия в цилиндрическом канале с урановой ( $^{238}\text{U}$ ) оболочкой.

Исследования по сокращению минимального значения рабочего параметра  $\rho R$  (с  $\rho R \sim 10 \text{ г/см}^2$ ) для существования волны термоядерного горения дейтерия имеют довольно давнюю историю. В настоящее время развитие работ по ускорительной технике позволяет рассматривать достаточно большой масштаб процесса ( $E_0 > 100 \text{ МДж}$ ), возможность существенного приближения к режиму *холодного сжатия* топлива, реализацию воспламенения инициирующей таблетки ДТ в режиме *Fast-Ignition*.

В докладе [1] на Международной конференции по тяжелоионному термоядерному синтезу NIF-2004 (Принстон, США) сделано заключение о возможном существовании волны термоядерного горения дейтерия в замагниченном канале с  $\rho R \sim 1 \text{ г/см}^2$  для состава  $\text{D}_{0,85}\text{T}_{0,03}\text{He}_{0,12}$ . В данной работе рассматривается возможность исключения трития из основного состава дейтериевого топлива при использовании в оболочке мишени урана-238.

Заранее не является очевидным существование волны термоядерного горения в таких сложных условиях при значительной разнице в скоростях гидродинамических, излучательных и нейтронных процессов. В случае существования волны термоядерного горения дейтерия может быть исключена проблема по воспроизводству трития в литиевом бланкете термоядерной микровзрывной энергетической системы.

### Термоядерное горение дейтерия в условиях мощного тяжелоионного драйвера

Рассмотрение проблемы термоядерного горения дейтерия в условиях мощного релятивистского драйвера [2] базируется на трех основных гипотезах:

1. В энергетической системе допустимо увеличение масштаба микровзрыва до  $E_k \sim 30 \text{ ГДж}$  в отличие от ограничения  $E_k \sim 3 \text{ ГДж}$  [3], соответствующего заключению Европейской исследовательской группы по тяжелоионному синтезу [4].
2. Мощный релятивистский драйвер позволяет обеспечить сжатие дейтерия до плотностей  $\rho \sim 100 \text{ г/см}^3$ .
3. Использование оболочки из урана-238 способствует распространению волны термоядерного горения по цилиндрическому каналу из дейтерия ( $\rho R \geq 3 \text{ г/см}^2$ ).

### Сжатие мишени

В предположении возможности существования волны термоядерного горения дейтерия при параметрах сжатия  $\rho R \sim 3 \text{ г/см}^2$  были рассмотрены два типа конструкции мишеней и определены основные требования к параметрам пучков ионов тяжелоионного ускорителя.

**Многослойная мишень.** Схема многослойной мишени для одномерных расчетов отражена в табл. 1. В ней  $N$  — число расчетных точек в слое;  $R$  — радиус слоя в мишени;  $\rho$  — начальная плотность слоя;  $M_L$  — погонная масса слоя;

$X_D, X_T, X_{He}$  — концентрация дейтерия, трития и гелия соответственно.

Параметры облучающих пучков приведены в табл. 2, где  $J_m$  — мощность энерговложения в мишень;  $R_j$  — радиус кольцевой зоны облучения мишени;  $\tau_j$  — время облучения мишени;  $P_{ow}$  — мощность облучающего пучка;  $E_j$  — полная энергия пучка.

Для многослойной мишени были получены следующие данные:

$$\begin{aligned} \rho R &= 3,84 \text{ г/см}^2; & \rho_{DD} &\sim 50 \text{ г/см}^3; \\ \rho_U &\sim 200 \text{ г/см}^3; & M_U &\sim 34,4 \text{ г/см}. \end{aligned}$$

$(R, t)$ -диаграмма сжатия представлена на рис. 1.

Таблица 1

Схема многослойной мишени

Номер слоя	Состав слоя	$N$	$R$ , см	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$M_L$ , г/см	$X_D$	$X_T$	$X_{He}$
1	DD	10	1,4	0,16	0,985	1,0	0,0	0,0
2	U	30	1,58	19,5	34,4	—	—	—
3	U	10	2,3	5,5	47,8	—	—	—
4	U	30	2,5	19,5	58,8	—	—	—
5	U	30	3,2	19,5	244,4	—	—	—
6	U	30	4,0	19,5	352,9	—	—	—

Таблица 2

Параметры ионных пучков

Пучок ( $j$ )	$J_m$ , ТВт/г	$R_j$ , см	$\tau_j$ , нс	$P_{ow}$ , ТВт	$E_j$ , МДж
1	2,5	2,50—3,30	0—250	2180,0	546,0
2	100	1,540—1,580	640—700	2350,0	142,0
3	250	0,900—1,000	900—940	5870,0	358,0
Полная энергия пучков ионов:					1046,0

Схема мишени с *игольчатым* ионным пучком. Система управления пучками релятивистских ионов позволяет рассматривать и такую конструкцию мишени, в которой хорошо сфокусированный релятивистский *игольчатый* пучок ионов (с радиусом  $r \sim 0,0500$  см) создает последовательно несколько узких кольцевых зон облучения сжимающей оболочки, "следящих" за ее движением. Предполагается, что на этом пути существует возможность существенного сокращения масштаба энерговложения.

Для мишени с *игольчатым* ионным пучком, схема которой для одномерных расчетов отражена в табл. 3, а параметры облучающих пучков приведены в табл. 4, были получены следующие данные:

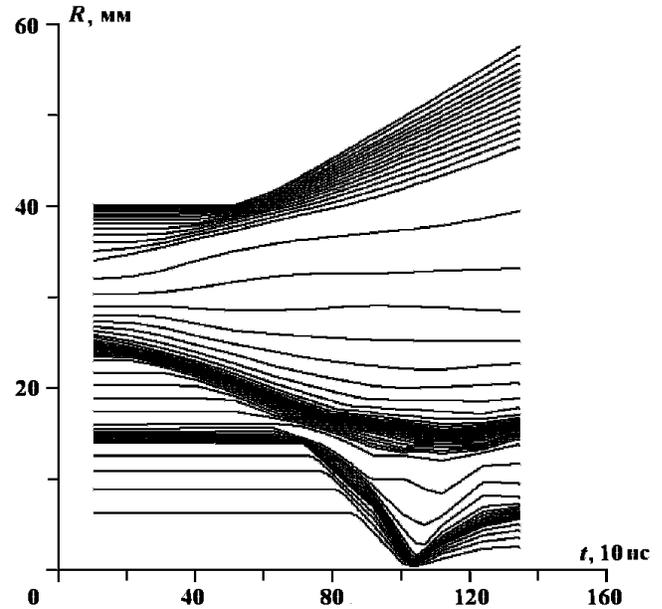


Рис. 1.  $(R, t)$ -диаграмма сжатия многослойной мишени

$$\begin{aligned} \rho R &= 2,94 \text{ г/см}^2; & \rho_{DD} &\sim 55 \text{ г/см}^3; \\ \rho_U &\sim 200 \text{ г/см}^3; & M_U &\sim 152,5 \text{ г/см}. \end{aligned}$$

На рис. 2 представлена  $(R, t)$ -диаграмма сжатия мишени с *игольчатым* пучком.

Таблица 3

Схема мишени с *игольчатым* ионным пучком

Номер слоя	Состав слоя	$N$	$R$ , см	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$M_L$ , г/см	$X_D$	$X_T$	$X_{He}$
1	DD	5	3,9	0,16	0,194	1,0	0,0	0,0
2	DD	5	3,95	0,16	0,197	1,0	0,0	0,0
3	DD	5	4,00	0,16	0,199	1,0	0,0	0,0
4	U	50	4,30	19,5	152,5	—	—	—
5	U	30	5,00	19,5	398,8	—	—	—
6	U	25	6,00	19,5	673,9	—	—	—

Таблица 4

Параметры ионных пучков с пробегом  $\sim 100$  г/см<sup>2</sup>

Пучок ( $j$ )	$J_m$ , ТВт/г	$R_j$ , см	$\tau_j$ , нс	$P_{ow}$ , ТВт	$E_j$ , МДж
1	0,085	4,70 ± 0,05	0—2 000	0,015	30,0
2	0,400	4,00 ± 0,05	2 000—4 000	0,06	120,0
3	1,18	2,70 ± 0,05	4 000—5 500	0,12	180,0
4	12,8	1,00 ± 0,05	5 500—5 750	0,48	120,0
5	15,9	1,00 ± 0,05	5 750—5 840	0,60	60,0
6	316,0	0,05 ± 0,05	5 840—5 850	0,60	60,0
Полная энергия пучков ионов:					570,0

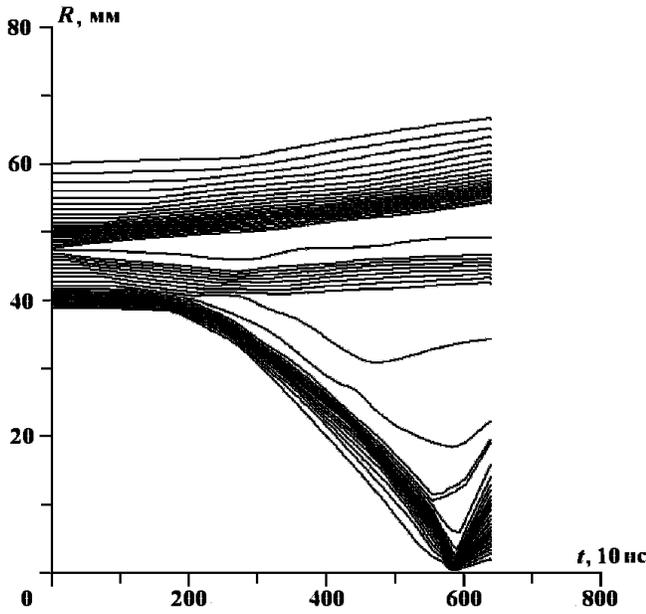


Рис. 2.  $(R, t)$ -диаграмма сжатия мишени с игольчатым пучком

### Горение дейтериевой мишени

Для упрощения расчетов процесс горения дейтериевой мишени пока рассматривается как отдельная двумерная задача. Начальные параметры для такого расчета задавались в следующем виде:

$$\begin{aligned} \rho R &= 3,0 \text{ г/см}^2; & \rho_{DD} &\sim 100 \text{ г/см}^3; \\ \rho_U &\sim 1000 \text{ г/см}^3; & M_U &\sim 10,0 \text{ г/см}. \end{aligned}$$

Состав основной "дейтериевой" области:  $D_{0,85} {}^3T_{0,01} {}^3He_{0,14}$ . Воспламенение мишени осуществлялось от DT-таблетки с помощью специального воспламеняющего пучка с параметрами, предложенными в проекте ИТЭФ на конференции НИГ-2002 [5].

В результате расчета было получено, что полное энергосодержание на длине в 2 см равняется  $E_k = 1,9 \cdot 10^{17}$  эрг. В данном модельном расчете в оболочке из урана-238 выделялась энергия  $E_u = 3,0 \cdot 10^{16}$  эрг за счет процессов деления под действием термоядерных нейтронов горения DD-состава. Такое энергосодержание соответствует выгоранию урана-238 примерно в 2%.

Распространение волны термоядерного горения дейтерия представлено на рис. 3. Можно отметить, что при распространении волны горения происходит существенное разделение температур ионов ( $T_i$ ), электронов ( $T_e$ ) и излучения ( $T_r$ ):  $T_i > T_e$ ;  $T_r < 2 \cdot 10^8$  К. При этом наиболее

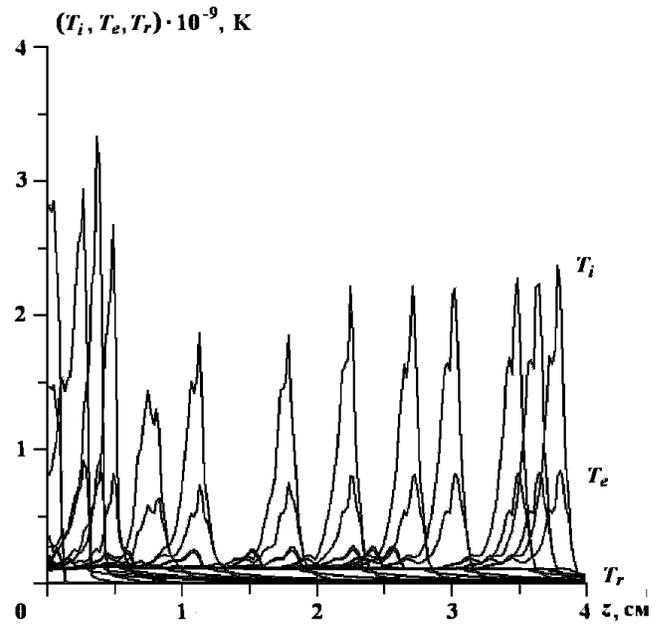


Рис. 3. Распространение волны термоядерного горения дейтерия, скорость волны горения  $D \sim 0,8$  см/нс, профили температур представлены через интервалы времени  $\Delta t \sim 0,2$  нс

интенсивное горение происходит при значительном увеличении начальной плотности в зоне горения, как это можно увидеть на рис. 4, где представлен профиль плотности дейтерия на момент  $t = 2$  нс.

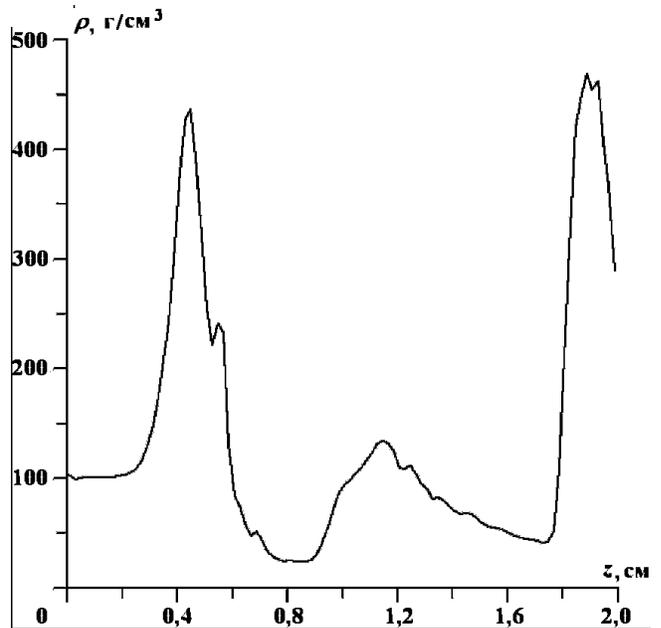


Рис. 4. Профиль плотности дейтерия на оси мишени в момент  $t = 2$  нс

Можно отметить также, что в расчете для релятивистского драйвера ( $\rho L = 100 \text{ г/см}^2$ ) получено воспламенение мишени при следующих параметрах воспламеняющего пучка:

$$J_m = 4 \cdot 10^{23} \text{ эрг}/(\text{г} \cdot \text{с}) = 4 \cdot 10^4 \text{ ТВт/г};$$

$$P_{ow} = 12\,000 \text{ ТВт};$$

$$R_{foc} = 0,0300 \text{ см}; \quad \tau = 1 \text{ нс}.$$

### Заключение

В данной работе используется очень упрощенная физико-математическая модель процессов горения дейтерия в цилиндрическом канале с оболочкой из урана-238. Задача рассчитывалась по двумерной программе А. Г. Аксенова [6] в трехтемпературном приближении с учетом только эффектов комптоновского рассеяния фотонов. Горение урана-238 под действием термоядерных нейтронов учитывалось только как дополнительное энерговыделение в виде бегущей волны с постоянной скоростью, примерно соответствующей скорости волны термоядерного горения дейтерия.

В ближайшее время представляется возможным провести существенное усовершенствование физико-математической модели: ввести учет тормозных и фотопроцессов в излучении (как это сделано в одномерной программе М. М. Баско [7]), учет распространения нейтронов в диффузионном приближении и т. п. Рассматривается также вопрос о переходе к более детальному учету спектральных и кинетических эффектов переноса энергии излучением и нейтронами.

Однако следует отметить, что, несмотря на все усовершенствования физико-математической модели, вопрос о необходимости экспериментальной проверки рассматриваемой гипотезы всегда будет сохранять свое значение. Кроме того, проведенная серия расчетов, конечно, не

является достаточной для оптимизации системы *драйвер — мишень — реактор*, хотя необходимый масштаб релятивистского ускорителя с энергией пучков ионов  $\geq 100 \text{ МДж}$ , видимо, сохранится.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 05-01-00097).

### Список литературы

1. *Aksenov A. G., Churazov M. D., Golubev A. A., Koshkarev D. G., Zabrodina E. A.* Cylindrical targets for heavy ions fusion // Nucl. Instr. and Methods. 2005. Vol. A 544. P. 412–416.
2. *Кошкарев Д. Г.* Мощный компактный тяжелоионный драйвер: Препринт 21-03. М.: ИТЭФ. 2003.
3. *Atzeni S., Ciampi M. L.* Potentiality of tritium-poor fuels for ICF fast ignitors // Fus. Eng. and Design. 1999. Vol. 44. P. 225–231.
4. The HIDIF-Study, Report of the European Study Group on Heavy Ion Driven Inertial Fusion. <http://www-aix.gsi.de/>.
5. *Basko M. M., Churazov M. D., Koshkarev D. G., Aksenov A. G.* Prospects of heavy ion fusion in cylindrical geometry // Laser Part. Beams. 2002. Vol. 10. P. 411.
6. *Aksenov A. G., Churazov M. D.* Deuterium targets and MDMT-code // Ibid. 2003. Vol. 21(1), issue 1. P. 81–84.
7. *Basko M. M.* Spark and volume ignition of DT and DD microspheres // Nucl. Fusion. 1990. Vol. 30. P. 2443.

Статья поступила в редакцию 10.04.06.