

УДК 533.9

ТЕРМОЯДЕРНОЕ ГОРЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ В СИСТЕМЕ МОЩНОГО ТЯЖЕЛОИОННОГО ДРАЙВЕРА

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

Исследуется термоядерное горение цилиндрических мишеней в условиях мощного релятивистского тяжелоионного драйвера. Для DT-топлива рассматривается энерговклад в мишень на уровне ≥ 100 МДж при энергии ионов ~ 1000 ГэВ. Сделаны оценки горения для перспективных видов топлива.

1. Основные проблемы энергетической системы тяжелоионного термоядерного синтеза

Параметры мощного тяжелоионного драйвера нового типа [1] и система управления пучками ионов позволяют обеспечить надежное срабатывание DT-мишени в системе инерциального термоядерного синтеза:

- достигаются необходимые значения параметра сжатия $\rho R \geq 0,5$ г/см²;
- могут быть получены большие значения плотности топлива $\rho \sim 100$ г/см³;
- обеспечивается воспламенение DT ($T_{DT} \geq 5$ кэВ).

Характерные энергетические параметры такой системы соответствуют масштабу микро взрыва в 2,5 т. э. Хотя в настоящее время все параметры по драйверу, мишени и реактору получены на основе теоретических оценок, тем не менее не существует серьезных сомнений в возможности обеспечить работоспособность энергетической системы на DT с тепловой мощностью в ~ 1 ГВт.

Эффективность термоядерного горения DT-топлива определяется прежде всего возможностью существования волны термоядерного горения, распространяющейся вдоль оси цилиндрической мишени. Выделение в цилиндрической мишени специального участка для воспламенения позволяет достаточно экономно использовать энергию драйвера во всей мишени и получить эффективный коэффициент термоядерного усиления $G \geq 50$ [2]. При этом на основном

участке мишени необходимо решать задачу только по сжатию, а на небольшом участке инициации энергия может использоваться менее экономно для обеспечения воспламенения.

При использовании мощного тяжелоионного драйвера с релятивистскими энергиями ионов ~ 1000 ГэВ возникают также и новые, дополнительные трудности. Увеличение энергии ионов до 1000 ГэВ означает увеличение длины торможения ионов до $\rho l \sim 100$ г/см², появляется необходимость учета влияния на газодинамику процессов торможения вторичных частиц. Использование мощного драйвера с энерговложением в мишень $E_0 > 100$ МДж создает серьезные проблемы по обеспечению работоспособности реакторной камеры.

Несмотря на эти трудности, рассмотрение всех характеристик такой системы представляется целесообразным.

2. DT-мишень

Анализ работоспособности мишени в условиях мощного тяжелоионного драйвера проводился для массивной многослойной цилиндрической мишени, предложенной в [2]. Схема мишени представлена на рис. 1 для основной зоны мишени (на иницирующем участке мишени вместо $\rho_{DT} \sim 0,21$ г/см³ задается $\rho_{DT} \sim 0,07$ г/см³).

В связи с тем, что в ходе проверки работоспособности мишени по программам Deira4, MDMT-2, HD3T в ряде расчетов эффективное воспламенение DT не было получено, в схему об-



Рис. 1. Схема DT-мишени

лучения мишени введен дополнительный осевой пучок (с номером 4) достаточно высокой мощности.

Параметры облучающих ионных пучков представлены в табл. 1, где J_m — мощность энерго-вложения в мишень; R_j — радиусы кольцевой зоны облучения мишени; τ_j — время облучения мишени; P_{ow} — мощность облучающего пучка; E_j — полная энергия пучка.

Параметры ионных пучков, представленные в табл. 1, и схема облучения мишени находятся в определенном соответствии с возможностями тяжелоионной ускорительной системы. Дополнительный ионный пучок не является сверхмощным воспламеняющим пучком, как в проекте NIF-2002 [3], он только улучшает параметры кумуляции энергии сжатия для обеспечения воспламенения DT.

В двумерном расчете для демонстрации возникновения волны термоядерного горения использовался четвертый пучок с длительностью импульса, увеличенной с 1 до 3 нс, что также представляется возможным.

Эффективность термоядерного горения мишени инерциального синтеза определяется главным образом двумя противоречивыми параметрами: с одной стороны, необходимо обеспечить сжатие с параметром $(\rho R)_{DT} \sim 0,5$ г/см², с другой

стороны, — достичь высоких температур воспламенения $(T)_{DT} \sim 5$ кэВ. В случае мощного драйвера и массивной многооболочечной мишени различия в параметрах основного и иницирующего участков мишени могут быть достаточно малыми (например, снижение начальной плотности топлива на иницирующем участке с $\rho \sim 0,21$ г/см³ до $\rho \sim 0,07$ г/см³ повышает конечную температуру сжатия до нужного уровня и создает разновременность в моментах фокусировки только в $\Delta t \sim 1$ нс). Система управления пучками, параметры которой представлены в табл. 1, позволяет достаточно эффективно использовать газодинамические законы кумуляции энергии и получить в рассматриваемой мишени сжатие с $(\rho R)_{DT} \geq 0,5$ г/см² при плотности топлива $\rho \sim 100$ г/см³. Объемное сжатие при этом находится на уровне $\delta \sim 500$. Распространение волны горения по мишени вблизи зоны иницирования представлено на рис. 2.

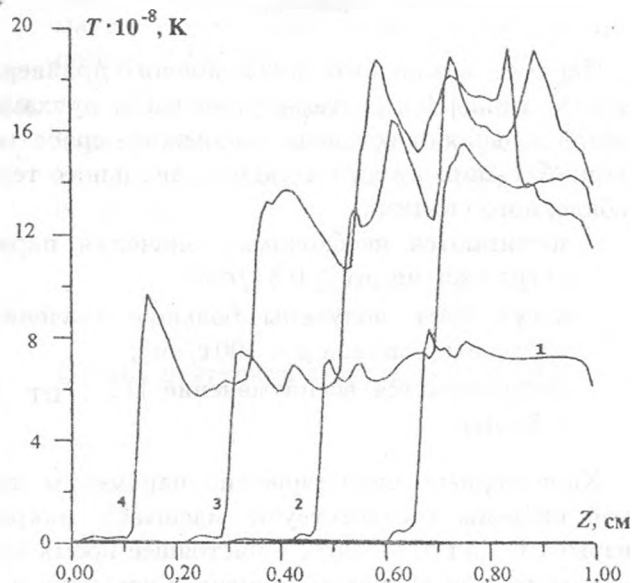


Рис. 2. Распространение горения в DT-мишени. Профили температуры для четырех моментов времени: 1 — $t = 3,78$ нс; 2 — $t = 4,28$ нс; 3 — $t = 4,74$ нс; 4 — $t = 5,21$ нс

Параметры ионных пучков для DT-мишени при длине мишени $L = 5$ см

Таблица 1

Номер пучка (j)	J_m , ТВт/г	R_j , см	τ_j , нс	P_{ow} , ТВт	E_j , МДж
1	50	0,397 ÷ 0,497	0 ÷ 25	1413	35.
2	350	0,275 ÷ 0,300	75 ÷ 100	1648.	41.
3	4 000	0,175 ÷ 0,195	100 ÷ 110	9294.	93.
4	50 000	0,00 ÷ 0,025	117 ÷ 118	9800.	9,8
Полная энергия пучков ионов:					178,8 МДж

Как показывают результаты ряда двумерных расчетов (распространение волны горения по уже сжатому каналу DT с золотой оболочкой), в данной DT-мишени возможно получение коэффициента термоядерного усиления $G \sim 50$ при полном энерговыделении $\sim 10\,000$ МДж. Обеспечение эффективного горения мишени требует, по оценкам, выполнения жестких условий по симметрии установки мишени по отношению к пучкам ионов ($\Delta X/X, \Delta Y/Y, \Delta Z/Z \sim 1\%$) и по угловой (φ) симметрии энерговложения. Предполагается, что необходимый уровень симметрии по φ обеспечивается вращением пучков вокруг оси мишени с частотой $\omega \sim 1$ ГГц.

Поиск оптимальных параметров цилиндрической мишени и облучающих ионных пучков основывался на результатах расчетов в группе А. В. Забродина (ИПМ им. Келдыша) по исследованию процессов *безударного сжатия*, где были получены очень большие значения плотности термоядерного топлива [4]. Параметры, приведенные в табл. 1 и на рис. 1, еще не являются результатом такой оптимизации; они только демонстрируют возможность целенаправленного управления процессами сжатия для достижения нужных условий по плотности и температуре. Из рис. 3 видно, что последовательное вложение энергии в различные слои мишени с учетом их движения приводит к постепенному увеличению концентрации кинетической энергии во внутренних оболочках.

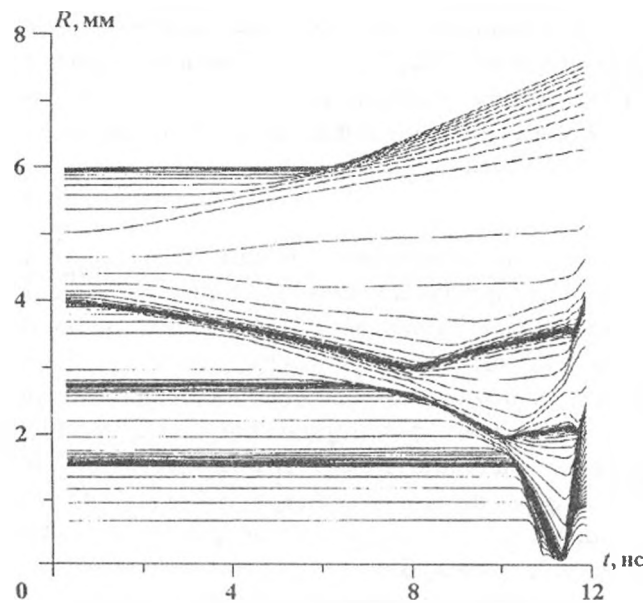


Рис. 3. (R, t) -диаграмма DT-мишени

3. Дейтериевые мишени

При переходе к дейтериевому топливу противоречивость главных параметров, определяющих работоспособность мишени, еще более усугубляется: необходимы параметры сжатия $(\rho R)_{DD} \sim 10$ г/см², а температура воспламенения находится на уровне $(T)_{DD} \sim 100$ кэВ. Если предполагать, что реально достижимая плотность топлива $\rho \sim 100$ г/см³, то эти требования означают существенное увеличение как массы мишени, так и масштаба необходимого энерговложения ($E_0 \sim 10\,000$ МДж). Не задаваясь пока вопросами практической реализации, рассмотрим развитие процессов в подобной мишени.

Воспламенение дейтериевого топлива может быть достигнуто с помощью введения в мишень инициирующей таблетки DT [5]. Целесообразно также рассматривать не просто дейтериевое топливо, а топливо в виде состава $D_{0,9}^3He_{0,1}$, вводя каталитическую добавку гелия-3. Схема такой мишени представлена на рис. 4. Параметры ионных пучков приведены в табл. 2.

В результате сжатия, (R, t) -диаграмма которого представлена на рис. 5, в термоядерном топливе может быть получена плотность $\rho \geq 100$ г/см³ и параметр сжатия $(\rho R)_{DD} \sim 10$ г/см². Использование таблетки DT существенно упрощает проблему воспламенения, так что основным вопросом становится вопрос о возможности существования волны термоядерного горения.

Этот вопрос исследовался по новой модернизированной двумерной многотемпературной программе MDMT-2 [6] с учетом переноса энергии быстрых нейтронов в диффузионном приближении. В расчете была получена стационарная волна термоядерного горения с небольшим коэффи-

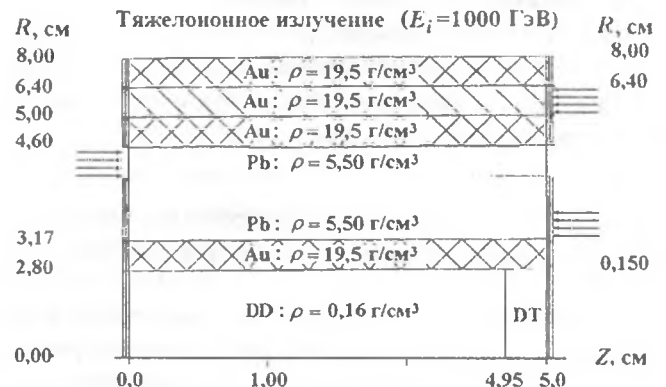


Рис. 4. Схема дейтериевой мишени с добавкой гелия-3

Параметры ионных пучков для дейтериевой мишени

Номер пучка (j)	J_m , ТВт/г	R_j , см	τ_j , нс	$P_{св}$, ТВт	E_j , МДж
1	2	5,0 ÷ 6,60	0 ÷ 500	11 600	5 827
2	100	3,080 ÷ 3,160	1 280 ÷ 1 400	15 700	1 881
3	250	2,200 ÷ 2,400	1 560 ÷ 1 600	72 500	2 889
Полная энергия пучков ионов:					10 597 МДж

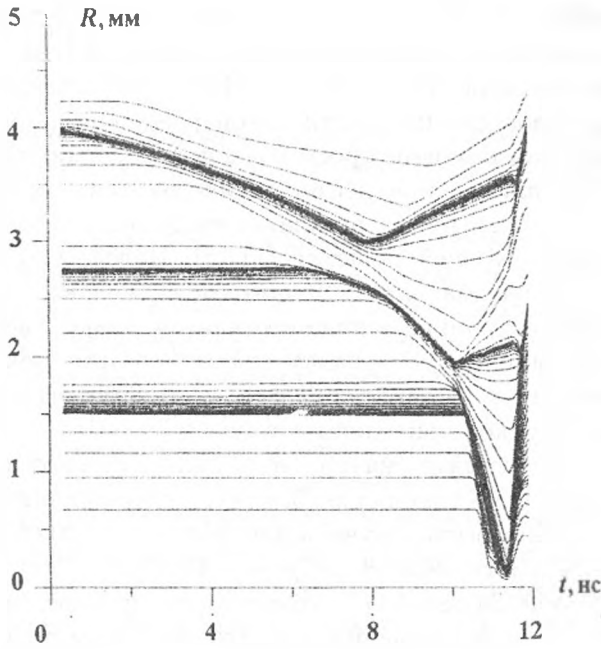


Рис. 5. (R, t) -диаграмма сжатия дейтериевой мишени с добавкой гелия-3

коэффициент усиления $G \sim 20$, представленная на рис. 6, где T_i, T_e, T_r — соответственно температуры ионов, электронов и излучения (T_i и T_e практически не различаются).

Рассматривался вопрос о снижении масштаба микровзрыва в подобной мишени, однако совместить требуемые параметры с параметрами мощного драйвера, приведенного в разд. 1, вряд ли возможно без введения дополнительной добавки трития.

4. Замагниченные дейтериевые мишени (MTF — magnetized target fusion)

В настоящее время снижение масштаба энерговыделения в дейтериевой мишени представляется возможным благодаря использованию магнитной теплоизоляции.

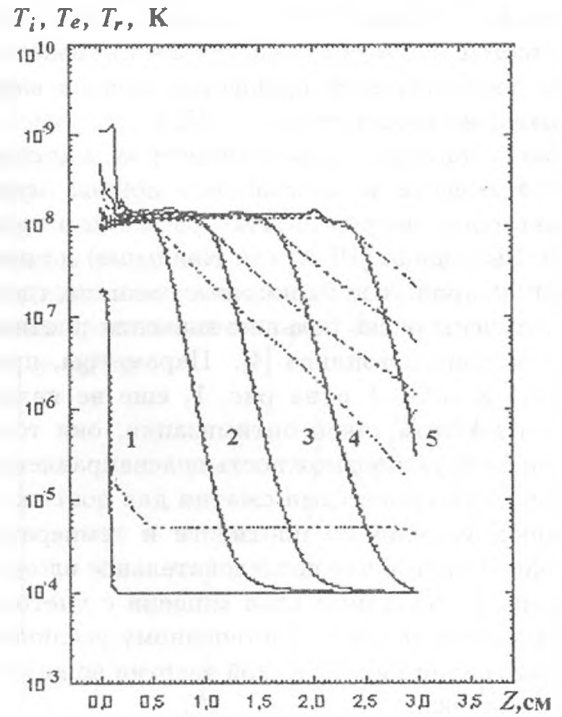


Рис. 6. Волна горения в дейтериевой мишени с добавкой гелия-3 ($D_{0,9}^3\text{He}_{0,1}$). Профили температуры $T(Z)$ для пяти моментов времени: 1 — $t = 0,005$ нс; 2 — $t = 0,55$ нс; 3 — $t = 1,55$ нс; 4 — $t = 2,89$ нс; 5 — $t = 4,53$ нс; — — — T_i ; - - - - T_e ; - · - · - T_r

По предварительным оценкам, введение в мишень начального магнитного поля $B_{0z} \sim 10^5$ Гс обеспечивает существенное снижение радиальных тепловых потоков электронной теплопроводности и возможность распространения горения по сжатому цилиндрическому каналу дейтериевого топлива с параметром $(\rho R)_{DD} \sim 1$ г/см². Схема замагниченной дейтериевой мишени представлена на рис. 7, а параметры облучающих пучков — в табл. 3.

Сокращение масштаба энерговыделения до уровня ~ 1000 МДж еще не позволяет рассматривать работоспособность системы даже с

Параметры ионных пучков для дейтериевой замагниченной мишени

Номер пучка (j)	J_m , ТВТ/г	R_j , см	τ_j , нс	P_{ow} , ТВТ	E_j , МДж
1	5	$1,25 \div 1,65$	$0 \div 250$	1 820	455,3
2	100	$1,540 \div 1,580$	$450 \div 490$	3 920	156,7
3	400	$0,500 \div 0,550$	$640 \div 680$	6 500	263,7
4	40 000	$0,000 \div 0,020$	$619 \div 624,0$	5 020	25,1
Полная энергия пучков ионов:					900,8 МДж

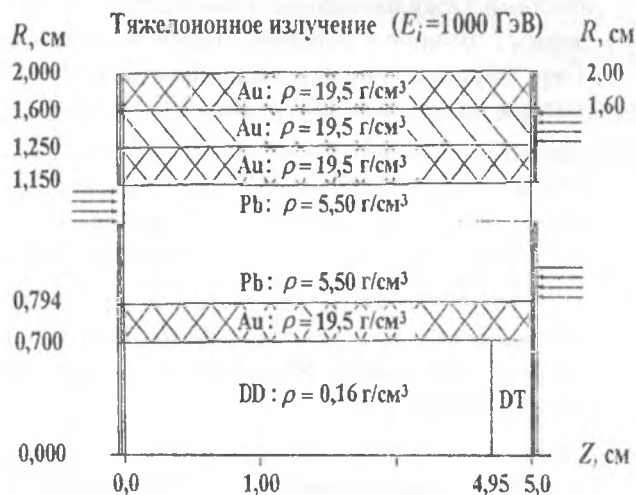
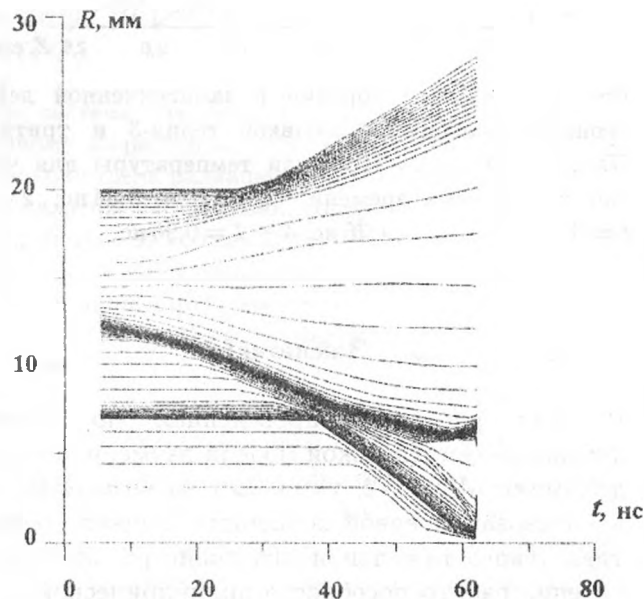


Рис. 7. Схема дейтериевой замагниченной мишени с добавкой гелия-3 и трития

таким мощным драйвером, как описанный в разд. 2. Однако не исключено, что для решения этой задачи можно использовать сложное ускорительное устройство из четырех мощных драйверов, где каждый драйвер обеспечивает один из четырех пучков, указанных в табл. 3. Ход сжатия на участке инициирования представлен на рис. 8.

Ряд расчетов, проведенных по одномерной программе Deiga4, указывает на возможность обеспечения сжатия с параметром $(\rho R)_{DD} \sim 1 \text{ г/см}^2$ и плотностью $\rho \geq 30 \text{ г/см}^3$ и возможность воспламенения таблетки DT. Следует отметить, что мощный тяжелоионный драйвер обеспечивает такое энерговыделение, которое можно рассматривать как *Fast Ignition*, хотя и на значительно более низком уровне, чем в случае DT-системы, представленной на конференции HIF-2002 ($J_m \sim 4 \cdot 10^4$ ТВТ/г вместо $J_m \sim 4 \cdot 10^6$ ТВТ/г в HIF-2002).

Достаточно сложным остается вопрос и о распространении волны термоядерного горения в

Рис. 8. (R, t) -диаграмма сжатия замагниченной дейтериевой мишени с добавкой гелия-3 и трития

замагниченном плазменном канале. В предварительных двумерных расчетах по программе MDMT-2 получено затухание волны термоядерного горения для чисто дейтериевого топлива с параметром $(\rho R)_{DD} \sim 1 \text{ г/см}^2$. В настоящее время исключить затухание волны горения представляется возможным при введении в дейтериевое топливо определенной добавки трития. В расчете по программе MDMT-2 для состава $D_{0,85}^3 T_{0,03}^3 He_{0,12}$ получено распространение волны термоядерного горения в замагниченном плазменном канале с $(\rho R) \sim 3,0 \text{ г/см}^2$ и плотностью оболочки $\rho \geq 1000 \text{ г/см}^3$ (рис. 9). Для мишени с длиной $L \sim 5 \text{ см}$ полное энерговыделение можно оценить как $E_k \sim 15000 \text{ МДж}$ с коэффициентом термоядерного усиления $G \sim 15$. Выделяемое количество нейтронов может обеспечить воспроизводство трития.

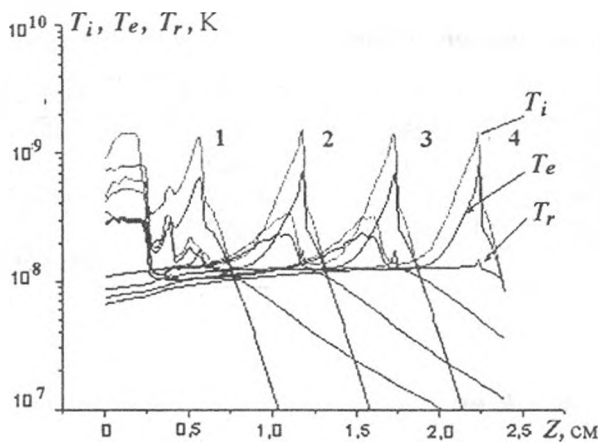


Рис. 9. Волна горения в замагниченной дейтериевой мишени с добавкой гелия-3 и трития ($D_{0,85}T_{0,05}^3He_{0,12}$). Профили температуры для четырех моментов времени: 1 — $t = 0,34$ нс; 2 — $t = 0,55$ нс; 3 — $t = 1,76$ нс; 4 — $t = 0,96$ нс

5. Заключение

Серия расчетов, проведенная по новой физико-математической модели двумерной газодинамики MDMT-2, указывает на возможность использования новой концепции мощного релятивистского тяжелоионного драйвера для обеспечения работоспособности цилиндрической мишени с DT и D-T-He-топливом.

Масштаб энерговыделения цилиндрической мишени при таком режиме с волной термоядерного горения оказывается достаточно большим и находится для DT на уровне $\sim 10\,000$ МДж, а для D-T-He-топлива на уровне $\sim 50\,000$ МДж.

Физико-математическая модель MDMT-2, по видимому, позволяет достаточно полно описать развитие физических процессов в данном классе мишеней и может служить основой для при-

нятия решения о разработке системы с мощным релятивистским тяжелоионным драйвером.

Список литературы

1. Кошкарев Д. Г. Мощный компактный тяжелоионный драйвер: Препринт 21-03. М.: ИТЭФ, 2003.
2. Чуразов М. Д., Аксенов А. Г., Забродина Е. А. Сжатие многослойной мишени в системе тяжелоионного термоядерного синтеза // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 3. С. 62–65.
3. Medin S. A., Churazov M. D., Koshkarev D. G., Sharkov B. Yu., Orlov Yu. N. Evaluation of power plant concept for fast ignition heavy ion fusion // Laser and Particle Beams. 2002. Vol. 20 (3). P. 419–422.
4. Dolgoleva G. V., Zabrodin A. V. Non-shock targets compression: Preprint No 53, Moscow: Keldysh IAM, 1999.
5. Чуразов М. Д., Забродина Е. А., Аксенов А. Г., Арпишкин Ю. П. Термоядерное горение дейтерия в цилиндрическом канале с бериллиевой оболочкой // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 2. С. 44–47.
6. Aksenov A. G., Churazov M. D. Deuterium targets and "MDMT"-code // Laser and Particle Beams. 2003. Vol. 21(1), issue 1. P. 81–84.

Статья поступила в редакцию 14.12.04.