

ФГУП  
"РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР —  
ВНИИЭФ"

ВОПРОСЫ  
АТОМНОЙ НАУКИ  
И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ:

Математическое моделирование  
физических процессов

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ВЫПУСК 2

Издается с 1978 г.

Саров — 2008

УДК 533.9+519.6

## ВОЛНА ТЕРМОЯДЕРНОГО ГОРЕНИЯ В МИШЕНИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ТЯЖЕЛОИОННОГО ДРАЙВЕРА

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

Рассматривается комплекс расчетно-теоретических оценок процесса распространения волны термоядерного горения в дейтериевой мишени для мощного релятивистского тяжелоионного драйвера. В новой физико-математической модели (MDMT-N) учтены основные эффекты, связанные с нейтронными процессами в гибридной мишени. Показана возможность существования волны термоядерного горения в дейтериевом топливе цилиндрической мишени с  $\rho R \sim 3 \text{ г/см}^2$ . Рассмотрена новая схема управления пучками ионов релятивистского драйвера, позволяющая обеспечить воспламенение инициирующей таблетки ДТ.

### Основные проблемы использования дейтериевого топлива в мишени для релятивистского тяжелоионного драйвера

На основании ряда численных расчетов в настоящее время можно считать, что для дейтериевой мишени рабочий масштаб энерговыделения находится на уровне  $\sim 50\,000$  МДж ( $\sim 10$  т.т.э.). При этом предполагается следующее:

1. Тяжелоионный релятивистский драйвер [1] создает пучки ионов (для сжатия и воспламенения мишени) со следующими основными параметрами: энерговложение для сжатия мишени  $E_o \sim 500$  МДж; для воспламенения ДТ-инициатора  $E_{ign} \sim 100$  МДж при максимальной мощности  $P_{ow} \sim 1$  ПВт.
2. Система управления пучками тяжелых ионов позволяет обеспечить режим *холодного* сжатия термоядерного топлива и получить параметр сжатия  $\rho R \geq 3 \text{ г/см}^2$ . Для инициирования ДТ может быть использована система пучков с радиальным энерговложением в сжатую мишень.
3. Использование оболочки из урана-238 обеспечивает распространение волны термоядерного горения по цилиндрическому каналу из дейтерия ( $\rho R \geq 3 \text{ г/см}^2$ ) и получение коэффициента термоядерного усиления  $G \sim 100$ .

4. Ядерные процессы, возникающие при торможении релятивистских пучков ионов, не изменяют качественной картины процессов в мишени, хотя и требуют введения определенной корректировки в конструкцию мишени.
5. Система утилизации энергии термоядерного микровзрыва возможна без разрушения элементов системы управления ввода пучков в реакторную камеру.

### Сжатие мишени

Большой масштаб энерговложения ( $E_o \sim 500$  МДж) от мощного релятивистского тяжелоионного драйвера и возможность эффективного управления пучками (профилирование энерговложения по радиусу и по времени) позволяют получить параметр сжатия на уровне  $\rho R \sim 3 \text{ г/см}^2$ .

При использовании схемы мишени с *иглычатым* ионным пучком [2], когда хорошо сфокусированный релятивистский пучок ионов (радиусом  $r \sim 0,0500$  см) создает последовательно несколько узких кольцевых зон облучения сжимающей оболочки, "следящих" за ее движением, было получено значение  $\rho R = 2,94 \text{ г/см}^2$ .

Суммарная энергия пучков ионов, облучающих мишень,  $E_{\Sigma} = 570$  МДж.

### Воспламенение DT-таблетки

Решение проблемы воспламенения DT в релятивистском драйвере возможно только при определенном усложнении схемы ввода энергии из-за заметного увеличения эффективного пробега ионов ( $\rho L \sim 60 \text{ г/см}^2$  вместо  $\rho L \sim 6 \text{ г/см}^2$  в проекте ИТЭФ НИФ-2002, [3]). Вводя ограничение по мощности одного пучка ионов в 1 ПВт, для воспламенения приходится прибегать к схемам ввода энергии со сложением пучков. Большой радиус мишени позволяет при радиальном облучении использовать подвод энергии несколькими отдельными пучками, сходящимися к оси под небольшими углами. Подобная схема уже рассматривалась для сферической мишени [4]. Для шести пучков, сходящихся к оси мишени, достигается мощность ввода энергии в 6 ПВт. С учетом возможности расположения пучков в узкой зоне по оси мишени ( $\Delta z = 0,06 \text{ см}$ ) и условия фокусировки пучков в веществе мишени при радиальном схождении к оси может быть достигнута достаточно высокая интенсивность энерговыделения в DT-топливо. Кроме того, существенное влияние на воспламенение может также оказать разогрев оболочек, окружающих DT.

В одномерном расчете по программе Deiga4 [5] при задании погонной мощности энерговыделе-

ния  $W_{driv} = 3 \cdot 10^4 \text{ ТВт/см}$  было получено воспламенение DT при длительности импульса  $\tau \sim 10 \text{ нс}$ .  $(R, t)$ -диаграмма сжатия и воспламенения представлена на рис. 1.

В инициирующей таблетке DT были получены высокие температуры ( $T_e = 29 \text{ кэВ}$ ;  $T_i = 78 \text{ кэВ}$ ;  $T_r = 4 \text{ кэВ}$ ), что позволяет надеяться на инициирование основного топлива.

Для определения параметров пучков, инициирующих горение таблетки DT, необходимо проведение двумерных расчетов. В ряде двумерных расчетов для заключительной стадии сжатия была продемонстрирована возможность воспламенения дейтериевого топлива от таблетки DT с аксиальным размером в 0,06 см.

Предполагая возможность фокусирования радиальных пучков для достижения такого размера, можно получить оценку энергии воспламеняющих пучков:  $E_{ign} = W_{driv} \Delta z \tau = 3 \cdot 10^4 \text{ ТВт/см} \times 0,06 \text{ см} \cdot 10 \text{ нс} \sim 20 \text{ МДж}$ .

Воспламенение DT-таблетки от шести радиальных пучков, в общем, является трехмерным процессом. Однако несимметрия ввода энергии в этом случае на стадии воспламенения не представляется определяющей. Распределение плотностей в мишени в момент воспламенения при данной ситуации представлено на рис. 2.

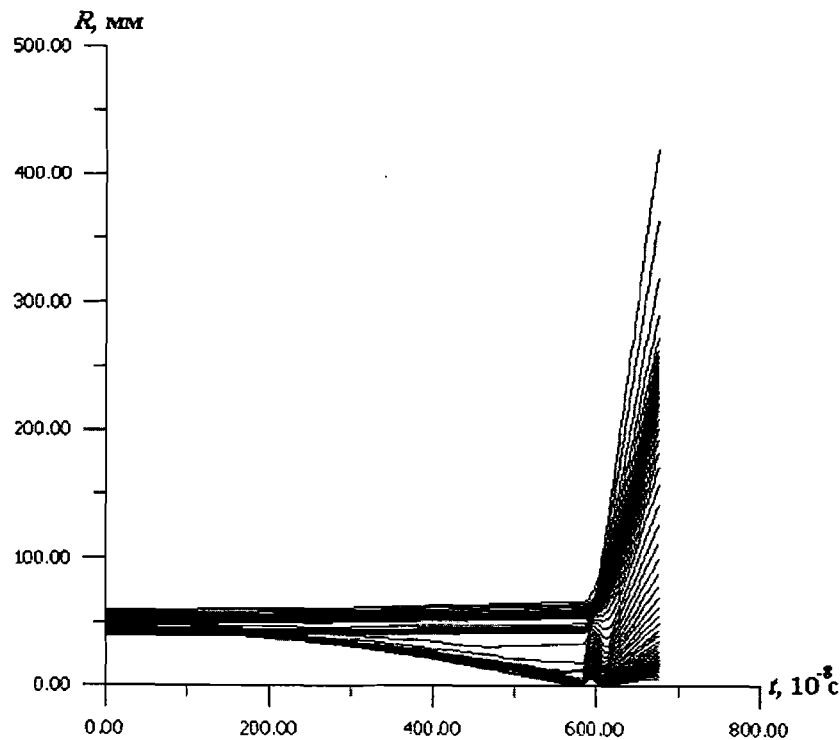


Рис. 1.  $(R, t)$ -диаграмма сжатия и воспламенения DT

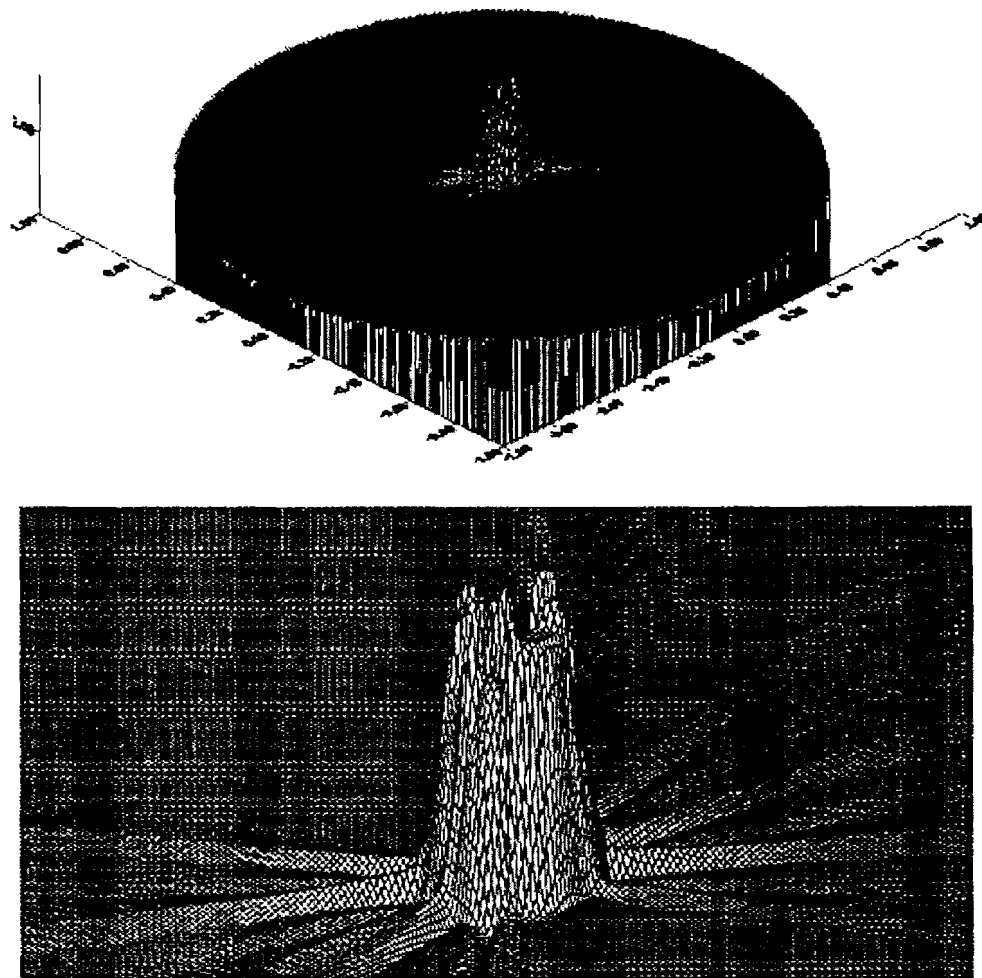


Рис. 2. Распределение плотностей  $\log \rho(r, \varphi)$  в мишени в момент воспламенения (внизу — центральная часть в увеличенном масштабе)

В данном двумерном расчете для инициирования горения DT-таблетки задавалось шесть радиальных пучков ионов с интенсивностью энерговложения  $J_m = 2,2 \cdot 10^{22}$  эрг/(г·с) в радиусе 1 см. Расчет демонстрирует возможность воспламенения (достижения температуры плазмы  $\sim 100$  кэВ), несмотря на наличие существенной несимметрии по углам. Полная мощность инициирующих пучков для данного модельного случая с  $\Delta z = 0,02$  см составляет  $\sim 30$  ПВт.

#### Воспламенение дейтериевого топлива

В расчете по программе MDMT-N было получено воспламенение дейтериевого топлива с составом  $D_{0,90}{}^3T_{0,0}{}^3He_{0,10}$  (0,90; 0,00; 0,10) и распространение волны горения вдоль оси на расстояние 0,6 см. Характерные параметры волны горения для  $\rho R = 3$  г/см<sup>2</sup> представлены в табли-

це и на рис. 3, 4 (см. также цветную вкладку). Следует отметить, что при использовании оболочки из урана-238 уже нет необходимости во введении в мишень магнитной теплоизоляции, как это предполагалось в [6].

В расчете по программе НЗТ [7] в дейтериевое топливо была введена небольшая добавка трития, что привело к существенному изменению режима горения (см. таблицу и рис. 4).

В модельном расчете по программе НЗТ инициирование горения дейтериевого топлива с составом  $D_{0,85}{}^3T_{0,03}{}^3He_{0,12}$  осуществлялось от DT-таблетки с  $\Delta z = 0,06$  см при интенсивности энерговложения  $J_m = 8,10^{25}$  эрг/(г·с). Мощность инициирующего торцевого пучка была на уровне  $\sim 270$  ПВт.

В модельном расчете инициирования по программе MDMT было получено достаточно эффективное горение дейтериевого топлива при об-

Параметры волны горения

Расчетная программа	Состав топлива: D, T, He-3	Плотность топлива, г/см <sup>3</sup>	$T_i$ , кэВ	$T_e$ , кэВ	$T_r$ , кэВ	Скорость волны, см/с	Энерговыделение, МДж
МДМТ	0,90, 0,0, 0,1	100	25	25	18	$60 \cdot 10^7$	30 000
НЗТ	0,85, 0,03, 0,12	100	240	100	10	$100 \cdot 10^7$	~ 50 000

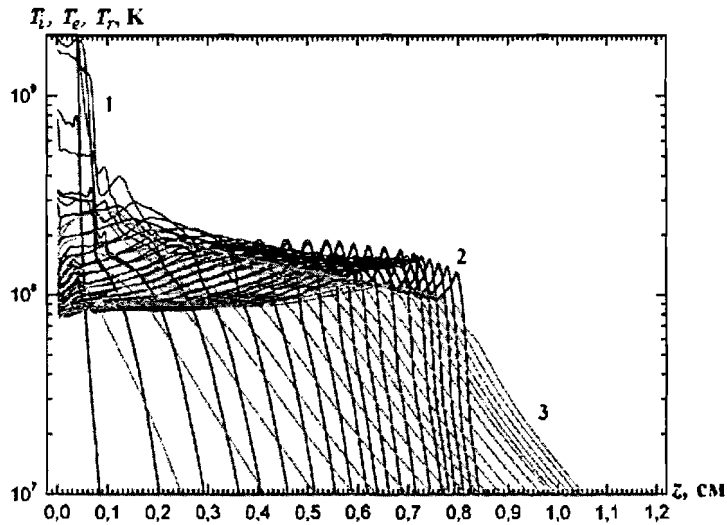


Рис. 3. Распространение волны горения в дейтериевом топливе с составом  $D_{0,90}{}^3T_{0,0}{}^3He_{0,10}$  при  $\rho R = 3 \text{ г/см}^2$  (расчет по программе МДМТ-Н): 1 —  $T_i$ ; 2 —  $T_e$ ; 3 —  $T_r$ .

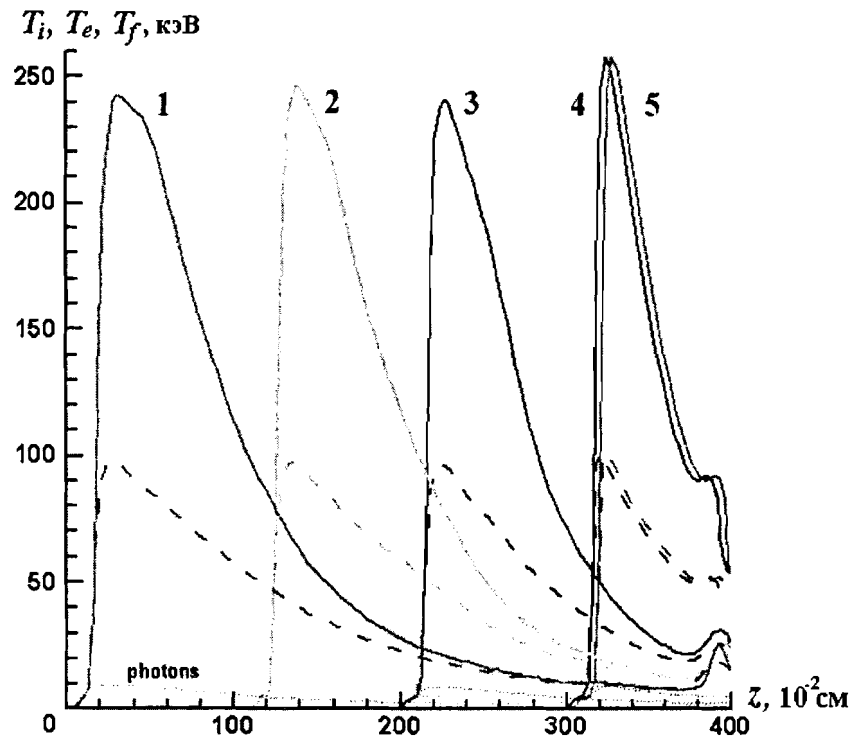


Рис. 4. Распространение волны термоядерного горения в дейтериевом топливе с составом  $D_{0,85}{}^3T_{0,03}{}^3He_{0,12}$  (расчет по программе НЗТ): — — —  $T_i$ ; - - - -  $T_e$ ; ··· —  $T_f$ ; 1 —  $t = 0,3370$ ; 2 —  $t = 0,2634$ ; 3 —  $t = 0,1988$ ; 4 —  $t = 0,02$ ; 5 —  $t = 0,1016$

лучении радиальными пучками кольцевой зоны таблетки DT с  $\Delta z = 0,02$  см при общей мощности иницирующих пучков на уровне  $\sim 10$  ПВт. На рис. 5 представлено полученное в расчете изменение внутренней и кинетической

энергии мишени в процессе иницирования. На рис. 6 показано распределение плотностей, полученное в данном модельном двумерном расчете на момент  $t = 3,3$  нс.

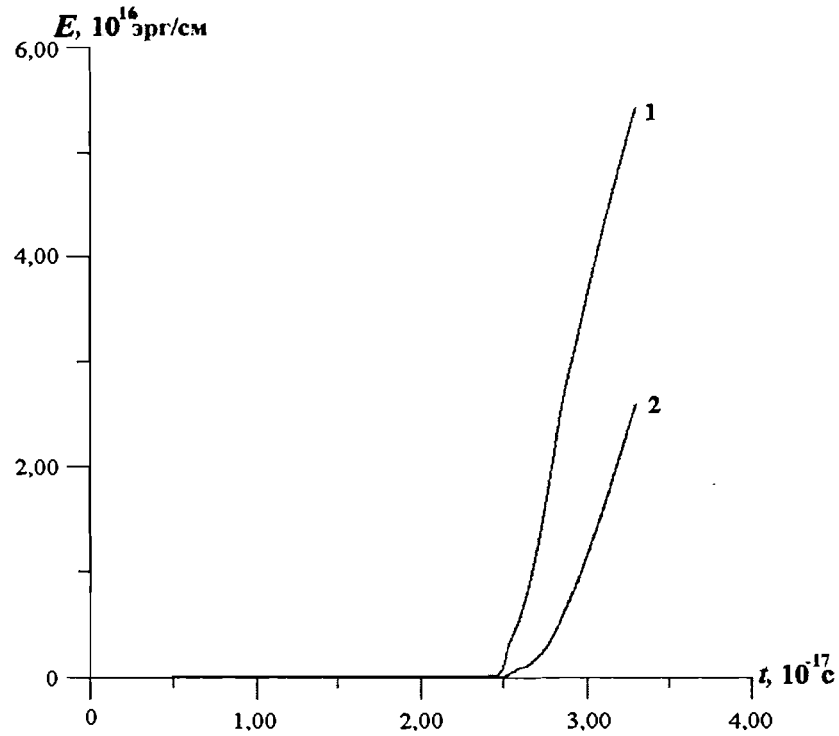


Рис. 5. Внутренняя (1) и кинетическая (2) энергия мишени в процессе иницирования

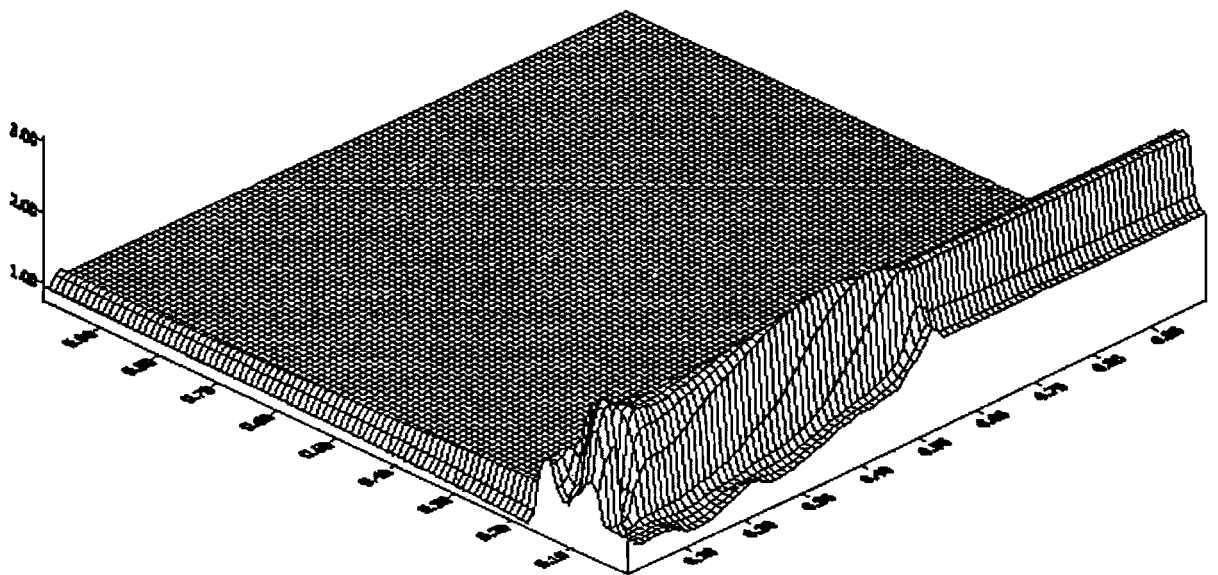


Рис. 6. Распределение плотностей  $\log \rho(r, z)$  в мишени при  $t = 3,3$  нс

### Физико-математическая модель

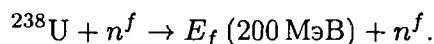
Основное изменение в двумерной программе (MDMT-N) для расчета процессов сжатия и горения связано с введением учета эффектов, определяющих перенос нейтронов термоядерных реакций, и с учетом получения дополнительной энергии при делении урана-238. Характерные особенности программы MDMT [6] были сохранены.

В данной физико-математической модели рассматривается одножидкостное гидродинамическое многомерное приближение для многокомпонентной многотемпературной плазмы.

Перенос энергии электронами, излучением, продуктами термоядерных реакций и нейтронами реализуется в рамках диффузионных процессов с физическими ограничениями тепловых потоков.

Для расчета энерговложения от пучков ионов ускорителя используется приближение прямолинейных траекторий.

Для упрощения задачи по учету нейтронных процессов задается фиксированная энергия быстрых ионов и рассматривается только одна реакция взаимодействия нейтронов с ураном-238:



Константы физических процессов взяты в основном из одномерной программы Deira [4].

### Заключение

Проведенная серия модельных расчетов свидетельствует о возможности обеспечения эффективного горения дейтериевого топлива в энергетической системе на базе мощного релятивистского тяжелоионного драйвера. Масштаб энерговложения в мишень находится на уровне  $E_o \sim 500$  МДж, а мощность отдельного воспламеняющего пучка (одного из шести) не превышает значения  $P_{ow} \sim 1\,000$  ТВт.

В расчетах для состава  $\text{D}_{0,85}\text{T}_{0,03}\text{He}_{0,12}$  было получено эффективное горение термоядерного топлива с большим выходом нейтронов, что

позволяет надеяться на возможность воспроизводства трития и гелия-3 в самой мишени.

### Список литературы

1. Кошкарев Д. Г. Мощный компактный тяжелоионный драйвер: Препринт 21-03. М.: ИТЭФ, 2003.
2. Аксенов А. Г., Баско М. М., Кошкарев Д. Г., Забродина Е. А., Чуразов М. Д. Волна термоядерного горения дейтерия в цилиндрическом канале с оболочкой из урана-238 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 2. С. 33–36.
3. Basko M. M., Churazov M. D., Koshkarev D. G., Aksenov A. G. Prospects of heavy ion fusion in cylindrical geometry // Laser Particle Beams. 2002. Vol. 10. P. 411.
4. Basko M. M. Spark and volume ignition of DT and DD microspheres // Nucl. Fusion. 1990. Vol. 30. P. 2443.
5. Баско М. М. Уравнения одномерной радиационной гидродинамики с теплопроводностью и кинетикой термоядерного горения: Препринт 145. М.: ИТЭФ, 1985.
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.
7. Забродин А. В., Прокопов Г. П. Методика численного моделирования двумерных нестационарных течений теплопроводного газа в трехтемпературном приближении // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1998. Вып. 3. С. 3–16.

Статья поступила в редакцию 27.09.07.