

УДК 539.3

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ ДВУХКАСКАДНОЙ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МИШЕНИ НА ОСНОВЕ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ**

© 2011 г.

*Г.В. Долголева*

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Москва

dolgg@list.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

В [1] авторы аналитически и численно исследовали конструирование микромишеней для осуществления термоядерного синтеза, базируясь на концепции безударного сжатия. Основой таких мишеней могут служить цилиндрические, слоистые системы. В настоящем исследовании рассматриваются двухкаскадные слоистые системы. Аналитически находятся законы энерговложения в первый и второй каскады с целью осуществления безударного сжатия рабочей ДТ-области. Преимущество ее по сравнению с однокаскадной областью заключается в более высоком проценте отбора энергии при кумуляции в ДТ-области, а, следовательно, в уменьшении необходимой величины внешнего энерговложения. Приведены аналитическое построение приближенного решения и результаты прямых расчетов в полной математической постановке.

*Ключевые слова:* двухкаскадные слоистые системы, безударное сжатие, аналитическое построение решения, численные расчеты, кумуляция энергии.

Главная задача при конструировании мишеней для управляемого термоядерного синтеза состоит в подборе геометрии и закона энерговложения, при которых можно получить горение рабочей ДТ-области. При этом энерговыход в результате термоядерных реакций должен быть больше, чем вложенная энергия (коэффициент усиления). И немаловажным вопросом является величина вкладываемой энергии.

В [1] авторы аналитически и численно исследовали конструирование микромишеней для осуществления термоядерного синтеза, базируясь на концепции безударного сжатия. Основой таких мишеней могут служить цилиндрические, слоистые системы.

Данная работа – это продолжение исследования [1]. В ней рассматриваются двухкаскадные слоистые системы, преимущество которых по сравнению с однокаскадными заключается в более высоком проценте отбора энергии при кумуляции в ДТ-области, а, следовательно, в уменьшении необходимой величины внешнего энерговложения.

Геометрия двухкаскадной цилиндрической мишени представлена на рис. 1.

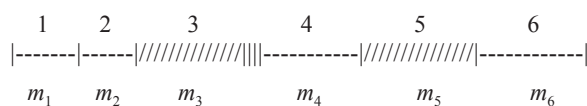


Рис. 1

Первый слой – ДТ-слой («рабочий» слой), слои 2, 4, 6 состоят из плотных материалов («тяжелые» слои), в «легкие» слои 3, 5 вводится внешнее энерговложение по определенному закону, которое обеспечивает движение слоя 2 и реализует безударное сжатие слоя 1. Это осуществляется тем, что на границе слоя с массой  $m_1$  выдерживается в течение некоторого времени движения значения  $u_1(t)$  и  $P_1(t)$ , которые характерны для безударного сжатия слоя 1 [2].

При выводе закона энерговложения ограничимся газодинамическим приближением и сделаем ряд предположений. Полагаем, что «тяжелые» слои (Au) несжимаемы (плотность считаем постоянной, а скорость в слое не зависит от пространственной переменной, т.е.  $u(m, t) = u(t)$ ); в слоях с нечетными номерами (3, 5) скорость  $u(m, t)$  линейна по массе:

$$u(m, t) = \frac{1}{\Delta m_i} [u_{i-1}(t)(m_i - m) + u_i(t)(m - m_{i-1})],$$

$$i = 3, 5.$$

Введем параметр  $u^*(t) = \alpha u_i(t)$  – фактор взаимной зависимости внутреннего и наружного каскадов.

С использованием полученного закона энерговложения была проведена серия расчетов. Цель расчетов – выявить преимущества двухкаскадной системы, если таковые имеются. Расчеты проводились с учетом физических процессов, адекват-

но описывающих физику плазмы [3].

Энерговложение в двухкаскадную систему осуществляется следующим образом. В области с массами  $m_3$  и  $m_5$  вкладывается энергия по формуле  $dE_i/dt = Q_i$ ,  $i = 3, 5$ . Первоначально значения  $Q_i$  вычисляются по полученным формулам энерговложения соответственно до заданной величины  $Q^*$  (величины обострения), это момент времени  $t_1$ . Величина  $Q^*$  – это характеристика установки, на которой планируется проводить эксперимент [4].

Далее энерговложение осуществляется только в область с массой  $m_3$  по формуле  $dE_3/dt = Q^*$  до тех пор, пока суммарная вложенная энергия в третью и пятую области не достигнет заданной величины:

$$F = \int_0^{t_k} \int_{m_3} \frac{dE_3}{dt} dm dt + \int_0^{t_1} \int_{m_5} \frac{dE_5}{dt} dm dt.$$

В таблице приведены результаты лучших расчетов двухкаскадной и однокаскадной мишеней с минимальной вкладываемой энергией, при которой они «загораются».

Таблица

$Q^*$	$F$	$F_{DT}$	$\Delta_D$	$K_{DT}$
6	2.1	37.32	84	17.77
6	0.9	29.1	70	32.3

Из расчетов видно, что в двухкаскадной мишени по сравнению с однокаскадной (см. строка 3 таблицы) снижается «порог» зажигания – величина вкладываемой энергии в систему для осуществления горения. Минималь-

ная вкладываемая энергия, необходимая для зажигания, в однокаскадной мишени равна  $F = 2.1$  при  $Q^* = 6$ , в двухкаскадной мишени достаточно  $F = 0.9$  при том же значении  $Q^* = 6$ .

Здесь использованы следующие обозначения:  $F_{DT}$  – величина энергосвечения в DT-области,  $K_{DT} = F_{DT}/F$  – коэффициент усиления мишени,  $\Delta_D$  – процент выгорания дейтерия в рабочей области. Энергия приведена в  $10^{-1}$  МДж.

### Заключение

Получены аналитические выражения для определения величины кумулирующей энергии в двухкаскадной слоистой системе оболочек.

Численно показано, что в двухкаскадной мишени по сравнению с однокаскадной снижается величина вкладываемой энергии в систему для осуществления горения: в двухкаскадной мишени достаточно  $F = 0.9$  в сравнении с  $F = 2.1$  для однокаскадной мишени при том же значении  $Q^* = 6$ , т.е. удается снизить энерговложение в 2.3 раза.

### Список литературы

1. Долголёва Г.В., Забродин А.В. Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия. М.: Физматлит, 2004.
2. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды М.: Наука, 1971.
3. Долголева Г.В. // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математич. физики. 1983. Вып. 2(13). С. 29–33.
4. Субботин В.И. и др. // Атомная энергия. 2004. Т. 97, вып. 3. С. 190–198.

## ANALYTICAL AND NUMERICAL CONSTRUCTION OF A TWO-STAGE CYLINDRICAL TARGET, BASED ON SHOCK-FREE COMPRESSION

*G.V. Dolgoleva*

The construction of micro-targets for fusion, based on the concept of shock-free compression was analytically and numerically considered in [1]. Cylindrical layered system [1] can be the basis for such targets. In the present paper, two-stage stratified systems are considered. Laws of energy input into the first and second stages are determined analytically in order to apply shock-free compression to the DT-working area. Their advantage over the single-stage systems is a higher percentage of energy extraction in the cumulation of the DT region and, therefore, a lower value of the required external energy input. Analytical construction of approximate solutions, as well as the results of direct calculations in a complete mathematical formulation are presented in the report.

*Keywords:* two-stage stratified system, shock-free compression, the analytical construction of solutions, numerical calculations, the accumulation of energy.