# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОКАСКАДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ ПРИ БЕЗУДАРНОМ СЖАТИЕПономарев И.В., Долголева Г.В.

# *ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

# wingof17@mail.ru, dolgg@list.ru

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

В докладе приводятся результаты численной проверки влияния ряда параметров в формулах энерговложения на горение (наличие термоядерных реакций) «рабочей» DT области при сжатии в мишени. Проверяется «замедление» в формуле энерговклада на величину энерговыделения, горение мишени при фиксированном по ширине пучке энерговклада.

# *Ключевые слова: термоядерная мишень, энерговложение, безударное сжатие, термоядерные реакции, состав рабочей области*

# INVESTIGATION OF THE OPERATION OF SINGLE-STAGE CYLINDRICAL TARGETS UNDER SHOCKLESS COMPRESSION

# Ponomarev I. V., G. V. Dolgoleva

# *Lomonosov Moscow State University, Moscow*

# wingof17@mail.ru, dolgg@list.ru

Annotation. The main task in designing targets for controlled thermonuclear fusion is to select the geometry and law of energy input, which can be used to obtain the ignition of the working DT-region. In this case, the energy output from thermonuclear reactions must be greater than the energy invested (gain).

The report presents the results of numerical verification of the influence of several parameters in the formulas alergologie on combustion (the presence of thermonuclear reactions) "working" DT-region under compression in the target. Checked "slowdown" in the formula of heat input on the magnitude of energy release, burning the target with a fixed width beam of the heat input.

# *Keywords: thermonuclear target, energy input, shockless compression, thermonuclear reactions, composition of the working area*

 В работе результаты получены при рассмотрении цилиндрической мишени, приведенной на Рис.1. Наш подход при численном моделировании мишени основывается на концепции безударного сжатия.

 **DT Au Pb Au**

|----------|-----------|//////////////|-----------|

 m0  m1 m2 m3

Рис. 1. Геометрия однокаскадной мишени

Чтобы сжимать область безударным образом на границе этой области нужно получить $U\_{l}$ и $P\_{l}$, обеспечивающие безударное сжатие. Такие $U\_{l}$ и $P\_{l}$ были получены К.П. Станюковичем[1]. Была найдена форма энерговложения $Q(t)$ [2] в слой m2 такая, чтобы на границе DT- слоя получаются нужные $U\_{l}$ и $P\_{l}$.



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| $$u\_{l}=\frac{2}{γ-1}c\_{0}\left(1-\left(1-\frac{c\_{0}}{L\_{0}}t\right)^{\frac{γ-1}{γ+1}}\right)$$ | $$P\_{l}=\frac{ρ\_{0}}{γ}c\_{0}^{2}\left(1-\frac{c\_{0}}{L\_{0}}t\right)^{- \frac{2γ}{γ+1}}$$ |  |

Форма энерговложения $Q(t)$, имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
| $$Q\left(t\right)=β\frac{2γc\_{0}^{3}G}{m\_{2}\left(γ-1\right)^{2}L\_{0}(γ+1)}ξ^{\frac{-2γ}{γ+1}}\left[ξ^{-1}\left(\frac{V\_{2}(0)}{aL\_{0}}+γ-1\right)+1-γ\right]$$ |  |

где $β$ – параметр «затягивания» по времени энерговложения

$ξ=1-\frac{c\_{0}t}{L\_{0}}$ – безразмерная переменная $(0\leq ξ\leq 1)$

$$G=m\_{0}\frac{(1-2k\_{2})}{γ}+\frac{2k\_{1}}{γ+1}+\frac{γ+1}{γ^{2}}k\_{3}m\_{0}^{2} a=\frac{2\left(m\_{1}+m\_{2}+m\_{3}\right)+\frac{(γ+1)m\_{0}}{γ}}{(γ-1)(2m\_{3}+m\_{2})}$$

$$k\_{1}=m\_{1}+\frac{m\_{2}}{3}+\frac{m\_{1}+\frac{m\_{2}}{2}}{\left(m\_{3}+\frac{m\_{2}}{2}\right)^{2}}\left(\frac{m\_{1}m\_{2}}{3}+m\_{1}m\_{3}+\frac{m\_{2}m\_{3}}{6}\right) k\_{2}=-\frac{\frac{m\_{2}}{3}\left(m\_{3}+\frac{m\_{2}}{4}\right)+m\_{1}\left(m\_{3}+\frac{m\_{2}}{2}\right)}{\left(m\_{3}+\frac{m\_{2}}{2}\right)^{2}}$$

Такая мишень загорается при минимальной вложенной энергии $E=21$ Мдж.

*Исследование влияния параметра «замедления» в формуле энерговклада на величину энерговыделения.*

Если положить параметр $β$ в формуле для $Q\left(t\right)$ (2) меньше единицы, то он позволяет затянуть, замедлить по времени процесс энерговложения. Исследуем влияние этого параметра на энерговыделение. Проварьируем величину $β$. В таблице 1 приведено значение величины $E\_{DT}$ – выделившейся энергии в области с массой из DT

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| $$β$$ | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,25 |
| $$E\_{DT}$$ | 331,65 | 341,17 | 347,7 | <0,8 |

Табл. 1. Полученные данные

Из расчетов видно, что наибольшее энерговыделение получается при
$β=0,2$. Мишень не горит при $β>0,2$. Итак, чтобы обеспечить горение рабочей области при безударном сжатии нужно в формуле для энерговложения $Q\left(t\right)$ вводить множитель «затягивания» энерговложения $β$, меньший или равный $0,2$.

*Энерговложение в фиксированную область.*

 Во всех известных расчетах энергия вкладывалась во всю область с массой . При вложении в нее энергии область разлетается и меняет свои первоначальные координаты. Но такое энерговложение не совсем удобно выполнить в техническом плане, так как пучок имеет фиксированную ширину и его сложно менять во времени. Поэтому были проведены расчеты с фиксированной шириной пучка, равного первоначальной длине области с массой .

В таблице 2 приведены характеристики этих расчетов на момент максимального сжатия. Первая строка- это расчет с переменной шириной области, вторая и третья строки с постоянной шириной области энерговложения.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Расчет | $$β$$ | $$E\_{DT}$$ | $$T\_{ср}$$ | $$ρ\_{ср}$$ | $$ρ∆r$$ |
| 1 | 0,2 | 347,7 | 3,47 | 679 | 1,3 |
| 2 | 0,2 | 0,015 | 1,16 | 460,4 | 0,96 |
| 3 | 0,1 | 328,5 | 1,6 | 386,9 | 0,82 |

Табл. 2. Полученные данные

где $β$ – параметр «затягивания» по времени энерговложения, $T\_{ср}$ –среднее значение температуры, $ρ\_{ср}$ – среднее значение плотности в области с массой из DT, $ρ∆r$ –характеристика загорания мишени

Мишень не горит при фиксированной ширине области энерговлжения при $β=0,2$. Если еще больше «затянуть» процесс энерговложения по сравнению со вторым расчетом: уменьшить $β$ до 0,1 и ниже, то мишень горит. Увеличение величины энерговложения, т.е. величины $F$, ни к чему хорошему не приводит (мишень не загорается), так как энергия еще полностью не вложена в систему, а первая область уже разворачивается и разлетается.

*Вариация состава рабочей области.*

В данной работе численно проведена вариация состава «рабочей» области: менялись концентрации дейтерия и трития. Цель – выяснить при каком минимальном значении трития мишень загорится. Тритий – материал достаточно дорогой (по денежным затратам на его получение) и «грязный» (в смысле отходов после горения). Результаты этой серии расчетов собраны в таблице 3.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Величины | I расчет | II расчет | III расчет | IV расчет | V расчет |
| $$α\_{D}$$ | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,85 |
| $$α\_{T}$$ | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,03+$$ |
| $$E\_{DT}$$ | 347,7 | 395,7 | 427 | 1,56 | 0,077 |

Табл. 3. Полученные данные

где $α\_{D},α\_{T}$ – концентрации дейтерия и трития в рабочей области.

Как видно из таблицы, максимальное энерговыделение в «рабочей» области получается при $α\_{D}=0,7$, $α\_{T}=0,3$. С меньшим количеством трития мишень не загорается.

Из проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- энерговкад в систему нужно «затянуть»: в формулу энерговыделения для $Q\left(t\right)$ ввести множитель, меньший единицы (приблизительно 0,2);

- при вложении энергии в фиксированную область нужно этот множитель еще уменьшить (приблизительно до 0,1);

- в мишени можно уменьшить состав трития до 0,3.

*Литература:*

1. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды // Наука, Москва, 1971 г.
2. Долголева Г.В., Забродин А.В. Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия // М.: Физматлит, 2004,71 с.