

## Программа «PELLET»

*Подготовка математической модели процессов в камере сгорания. Не закончено. Позднее математическое моделирование инерциального термоядерного синтеза стало основным направлением исследований, а тогда для этого просто не хватало вычислительных мощностей. В чем и пришлось убедиться.*

*И.Моисеев, 1.04.2010*

Программа

„PELLET“

НАЧАТА : 15.06.80  
ОКОНЧЕНА :

Цель программы:

1. Рассмотрение процессов термоядерного горения ДТ с инерционным удержанием.
2. Отработка методики создания физических моделей термоядерного горения с инерционным удержанием.
3. Отработка математических методов.
4. Выявление основных закономерностей термоядерного горения с инерционным удержанием.

Работы по программе "РЕБЕЛЕТ" должны обеспечить базу для рассмотрения более сложных мишеней и перспективных топлив.

Результаты полученные в ходе отработки программы должны сравниваться с экспериментальными и теоретическими результатами других исследователей с целью проверки правильности применяемых методов.

## Общее описание физической модели. А.

Рассматриваются процессы горения, излучения и расширения в сжатой, однородной мишени из DT нагретой до максимальной температуры  $Q_0$ . Температуры электронов и ионов предполагаются равными на всех этапах горения. Предполагается, что мишень остается однородной в процессе расширения. Исходя из того, что в перспективных топливах в продуктах реакции должны отсутствовать нейтроны, в данной модели влияние нейтронов не учитывается.

Рассматриваются следующие процессы:

1. Горение
2. Излучение
3. Поглощение части энергии продуктов сгорания веществом мишени.
4. Расширение мишени.

Все процессы рассматриваются по времени.

На всех этапах плазма считается полностью ионизированной и процессы рекомбинации не рассматриваются.



## Начальные условия

Плотность неона DT  $\rho_0 = 190 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Начальный радиус мишени:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3M}{4\pi\rho_0 S}} \quad (1-4)$$

Начальное число ионов  $N$

$$N_0 = \frac{M}{S} \cdot N_A \quad (2-4)$$

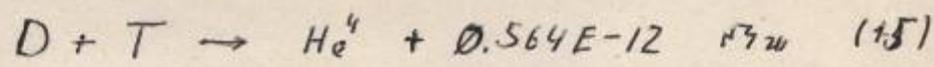
Начальная энергия плазмы

$$E_0 = 8 N k T \quad (3-4)$$

Начальное время  $T = 0$

## Горение. Физическая модель.

Рассматривается реакция



(нейтронами пренебрегаем!)

$\langle \sigma v \rangle$  для этой реакции аппроксимируется следующим образом [1, с.93]

|   |   |       |
|---|---|-------|
| при $Q < 0.116 \text{ ЕВ} \quad 0 \text{ К} \quad (10 \text{ кЭВ})$                                   | } | (2.5) |
| $SV = 3.8E-12 \cdot Q^{-2/3} \exp\{-19.02 Q^{-1/3}\} \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$                    |   |       |
| при $Q > 0.116 \text{ ЕВ} \quad 0 \text{ К} \quad (110 \text{ кЭВ})$                                  |   |       |
| $SV = 3.41E-14 \cdot Q^{-2/3} \exp\{-27.217 Q^{-2/3} + 3.638 Q^{-1/3}\} \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$ |   |       |

где  $Q - \text{ в кЭВ}$

Выделяемая энергия за время  $\Delta T$

$$\Delta E_{\text{выд}} = \frac{N^2}{4/3 \pi R^3} \langle \sigma v \rangle \cdot 0.564E-12 \Delta T \text{ [Дж]} \quad (3.5)$$

Уменьшение числа частиц дейтерия

$$\Delta N = 2 \cdot \frac{N^2}{4/3 \pi R^3} \cdot \langle \sigma v \rangle \cdot \Delta T \quad (4.5)$$

или

$$\Delta N = \Delta E_{\text{выд}} / 0.564E-12 \quad (5.5)$$

## Излучение. Физическая модель

Рассматриваются два механизма излучения: тормозной и излучение горячего тела. Считается, что в данный момент времени действующим является тот механизм, который обеспечивает меньшее энерговыделение излучением.

Тормозным излучением при рассеянии на  $\alpha$ -частицах пренебрегается, т.е. считается что  $\alpha$ -частицы достаточно близко покидают плазму.

Энергия выделяемая за счет тормозного излучения (DT):

$$E_{ZT} = \frac{4,9 \cdot 10^{24} \cdot 10^7 \cdot 10^6}{(1,16 \cdot 10^7)^{1/2}} \cdot \frac{1,3}{4\pi R} Q^{1/2} R^{-3} N^2 \Delta T [\text{J/s}] (1-6)$$

частота (max) 
$$\nu_{\text{max}} = \frac{3}{2} k Q / h \quad (2-6)$$

Энергия черного тела

$$E_{ZC} = 4\pi R^2 \sigma Q^4 \quad (3-6)$$

max длина волны 
$$\lambda_{\text{max}} = \frac{0,002898}{Q} \text{ м} \quad (4-6)$$

частота 
$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot Q}{0,002898} \text{ Гц} \quad (5-6)$$

Поглощение энергии  $\alpha$ -частиц.  
Физическая модель.

В области энергий до 40 кэВ поглощение энергии описывается формулой [1, с. 15]

$$\frac{dE_{\alpha}}{dE_{\alpha}} = - \frac{32\pi}{3} n e^4 v_{\alpha} \Lambda \frac{E_{\alpha}^{1/2}}{\Theta_e^{1/2}} \left(\frac{m_e}{m_{\alpha}}\right)^{1/2} \quad (11.7)$$

В данной программе рассчитываются следующие модели поглощения

$$\Delta E_{\text{погл}} = \Delta N \cdot \frac{R}{(R_{\alpha} + R)} \cdot 0.564 \cdot 10^{-12} \quad (12.7)$$

где

$$R_{\alpha} = \lambda_0 \Theta_e^{3/2} / n \quad (13.7)$$

или

$$R_{\alpha} = \lambda_0 \frac{Q}{3} \pi \frac{RQ^{3/2}}{N} \quad (14.7)$$

- т.е. считается
1. Влияние рассеяния на ионах незначительно
  2. Продукты ионизации достаточно быстро покидают плазму.

## Расширение мишени. Физическая модель.

Считается, что мишень расширяется со звуковой скоростью, сохраняя свою однородность.

Скорость расширения

$$V = V_0 Q^{1/2} \quad (1-8)$$

для DT  $V_0 = 3,5 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ ;  $Q$  - ктс.

тогда

$$R = R_0 + V \Delta t \quad (1-9)$$

## Определение max возможной скорости истечения

### Допущения

- 1 Считается, что в каждый интервал времени покидающие плазму  $\alpha$ -частицы имеют одинаковую энергию.
- 2 Считается, что непрозрачивающаяся плазма расширяется со скоростью, равной скорости максимального термического расширения.
- 3 Вклад электронов не учитывается.

В каждый интервал времени  $\Delta t$  энергия  $\alpha$ -частиц покидающих плазму

$$E_{\alpha} = \frac{E_{\text{вход}} - E_{\text{потр}}}{\Delta N} \quad (1-9)$$

где  $\Delta N$  - число частиц

$E_{\text{вход}}$  - входная энергия

$E_{\text{потр}}$  - энергия потраченная на кулоновских взаимодействиях.

Эти частицы несут импульс

$$\Delta P = \sqrt{2E_{\alpha} m_{\alpha}} \quad (2-9)$$

где  $m_{\alpha}$  - масса  $\alpha$  частицы

Кроме того непрозрачивающаяся плазма несет импульс

$$P_1 = (M - \Delta M) \cdot V_{\text{max}} \quad (3-9)$$

$$\text{где } \Delta M = \sum \Delta N \cdot m_{\alpha}$$

$$V_{\text{max}} = c \cdot T_{\text{max}}^{1/2}$$

$T_{\text{max}}$  - max температура.

Max возможная скорость истечения

$$W = (P_1 + \sum \Delta P) / M \quad (4-9)$$

## Вопросы, возникающие в ходе от- работки программы

1. Необходимы формулы аппроксимирующие «бв» для перспективных топлив
2. Необходимо рассмотреть тормозное излучение на продуктах реакции.
3. Необходима общая формула для поглощения энергии заряженных частиц в плазме.
4. Общая формула для скорости звука в плазме.
5. Учет времени термализации - в общем случае времени обмена энергии -  $i \rightarrow e$

Перевод коэффициентов в СИ.  
 определите числовые значения

$$(1-4) \quad \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi \cdot 190}} = 0.108 \quad C6$$

$$(2-4) \quad \frac{N_A}{5} = 1,204 \cdot 10^{26} \quad C9$$

$$(3-4) \quad \gamma k = 4,143 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{K} \quad C10$$

$$(2-5) \quad \frac{3,8 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-6}}{(1,16 \cdot 10^7)^{-2/3}} = \quad C1$$

$$\frac{19,02}{(1,16 \cdot 10^7)^{-1/3}} = \quad C2$$

$$\frac{2,41 \cdot 10^{-14} \cdot 10^{-6}}{(1,16 \cdot 10^7)^{-2/3}} = \quad C3$$

$$\frac{27,217}{(1,16 \cdot 10^7)^{-2/3}} = \quad C4$$

$$\frac{3,638}{(1,16 \cdot 10^7)^{-1/3}} = \quad C5$$

$$(4-6) \quad \frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{4,9 \cdot 10^{-25}}{(1,16 \cdot 10^7)^{1/2}} = \quad C11$$

$$(2-с) \quad \frac{3 k}{2 h} = 3,16 \cdot 10^{10} \quad C12$$

$$(3-6) \quad 4 \pi \sigma = 7,11 \cdot 10^7 \quad C13$$

$$(5-6) \quad 3 \cdot 10^2 / 0,0029 = 1.035 \cdot 10^{11}$$

$$(4-7) \quad 2 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2} \cdot (1,16 \cdot 10^7)^{-3/2} \cdot \frac{4}{3} \pi = \quad C8$$

$$(1-8) \quad \frac{3,5 \cdot 10^5}{(1,16 \cdot 10^7)^{1/2}} = 102.5 \quad C14$$

## Литература

[1] Браккер К., Фэжерна С., Управление лазерной  
системы, М., "Атомиздат" 1977

## Константы, использованные в программе

$$1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} = 1,16 \cdot 10^4 \text{ } ^\circ\text{К}$$

$$\rho_0 = 190 \text{ } \frac{10^3}{\text{м}^3}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$$

$$R = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot ^\circ\text{К}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$Q_d = 0,564 \cdot 10^{-12} \text{ Дж/ш}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ\text{К}^{-4}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

И.Мусеев, 15.06.1980