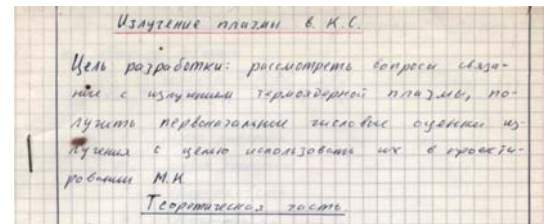


# Излучение плазмы в КС



Теоретическая часть.....	1
Тормозное излучение .....	1
Другие виды излучения.....	5
а) рекомбинационное .....	5
б) излучение черного тела.....	5
в) синхротронное излучение .....	5
Расчетная часть. ....	6
Вывод.....	6

Цель разработки: рассмотреть вопросы, связанные с излучением термоядерной плазмы, получить первоначальные числовые оценки излучения с целью использования их в проектировании МК.

## Теоретическая часть

Рассматривается реакция



Таким образом, продукты реакции состоят из  $\text{Li}^{3+}$ ,  $\text{He}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$  и  $e^-$ .

Считается, что плазма находится в состоянии теплового равновесия. Это определяет следующие механизмы излучения:

1. За счет излучения торможения на  $\text{Li}^{3+}$ .
2. За счет увеличения времени пребывания продуктов реакции в КС.
3. За счет максимальной температуры электронов.

Кроме того, будем считать, что температура плазмы не меняется. Справедливость этого допущения будет рассмотрена после получения числовых результатов.

## Тормозное излучение

Рассмотрим тормозное излучение плазмы. Тот факт, что именно тормозное излучение определяет величину полного излучения будет показан ниже.

Суммарная интенсивность тормозного излучения на единицу объема [1]:

$$P_T = \frac{16\pi^2 e^6 n_e \sum_i n_i z_i^2}{3c^2 m_e h} \sqrt{\frac{k T_e}{m_e}} \quad (2)$$

где:

$e$  – заряд электрона;

$m_e$  – масса электрона;

$c$  – скорость света;

$n$  – концентрация;

$z$  – заряд иона;

$h$  – постоянная Планка;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T_e$  – температура электронов.

Подставив в формулу (2) значения постоянных величин, получим:

$$P_T = 1,5 \cdot 10^{-40} n_e (n_{Li} z_{Li}^2 + n_{He} z_{He}^2 + n_H z_H^2) \sqrt{T_e} \left[ \frac{B_T}{H^3} \right] \quad (3)$$

Так как плазма расширяется, концентрация компонентов изменяется во времени по закону:

$$n_i = \frac{N_i}{\frac{4}{3}\pi V_i \tau} \quad (4)$$

где:

$N_i$  – число частиц  $i$ -го компонента;

$V_i$  – скорость (тепловая) частиц  $i$ -го компонента;

$\tau$  – текущее время.

$$\left. \begin{aligned} N_c &= 4 \frac{m}{\mu} N_A \\ N_H &= (1-S) \frac{m}{\mu} N_A \\ N_{Li} &= (1-S) \frac{m}{\mu} N_A \\ N_{He} &= 2S \frac{m}{\mu} N_A \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где:

$m$  – масса мишени;

$S$  – коэффициент сгорания;

$N_A$  – число Авагадро;

$\mu$  – молекулярный вес, (LiH = 8).

Скорость расширения ионов [2]:

$$\left. \begin{aligned} V_H &= \sqrt{\frac{ES}{3m_H}} \\ V_{He} &= \sqrt{\frac{ES}{3m_{He}}} \\ V_{Li} &= \sqrt{\frac{ES}{3m_{Li}}} \end{aligned} \right\} (6)$$

Будем рассматривать излучение каждого сорта ионов в отдельности, считая, что электроны от этих ионов расширяются с той же скоростью, что и ионы.

Температуры электронов [2]:

$$T_e = \frac{1}{9} ES k^{-1} \quad (7)$$

Излучение торможения на ионах  $Li^{3+}$ :

$$P_{Li}^n = 1,5 \cdot 10^{-40} \frac{(1-s) \frac{m}{\mu} N_A}{\left(\frac{4}{3} \pi \sqrt{\frac{ES}{3m_{Li}}}\right)^3} \frac{1}{3} \sqrt{\frac{ES}{k}} Z^2 \frac{4s \frac{m}{\mu} N_A}{\left(\frac{4}{3} \pi \sqrt{\frac{ES}{3m_{Li}}}\right)^3} \frac{1}{c^3} V \quad (8)$$

где  $V$  – объем плазмы:

$$V = \frac{4}{3} \pi \left( \sqrt{\frac{ES}{3m_{Li}}} \cdot \tau \right)^3 \quad (9)$$

Мощность излучения:

$$P_{Li}^n = 1,5 \cdot 10^{-40} Z^2 \frac{\sqrt{27} (\sqrt{m_{Li}})^3 N_A^2 (1-s) m^2}{\pi \mu^2 \sqrt{k} E} \frac{1}{c^3} [B_T] \quad (10)$$

или после подстановки постоянных:

$$P_{Li}^n = \cancel{1,5} \cdot 10^{-40} (1-s) m^2 \frac{1}{c^3} \cdot 1,55 \cdot 10^3 [B_T] \quad (11)$$

Проинтегрировав выражение (11) по времени получим энергию излучения:

$$E_{Li} = \int_{\tau_0}^{\infty} P_{Li}^n d\tau = \cancel{1,5} \cdot 10^{-40} (1-s) m^2 \frac{2}{2c^3} [J_4 \mu] \quad (12)$$

Проведем аналогичные преобразования для ионов водорода и гелия:

$$P_H^n = 9,32 \cdot 10^{-6} (1-S) m^2 \frac{1}{\tau^3} \quad [Вт] \quad (13)$$

$$E_H = 9,32 \cdot 10^{-6} (1-S) m^2 \frac{1}{2\tau^2} \quad [Дж] \quad (14)$$

$$\dot{P}_{He}^n = 5,97 \cdot 10^{-4} \frac{5 m^2}{\tau^3} \quad [Вт] \quad (15)$$

$$E_{He}^n = 5,97 \cdot 10^{-4} \frac{5 m^2}{\tau^2} \cdot \frac{1}{2} \quad [Дж] \quad (16)$$

Для вычисления этих величин необходимо определить время  $\tau_0$  – время начала тормозного излучения. Для определения диапазона изменения времени  $\tau_0$  примем следующую упрощенную модель поджига и горения. После попадания лазерного импульса на мишень внешний слой начинает расширяться с местной скоростью звука ( $\sim 10^6$  м/с), а остальная часть мишени начинает сжиматься со скоростью примерно равной звуковой. Реакция происходит за время примерно  $10^{-11}$  с, то есть (при рассмотрении излучения) практически мгновенно. Высокоэнергетические ионы, появившиеся в результате реакции, тоже практически мгновенно достигают внешней оболочки и нагревают ее. Этот момент и будут являться моментом начала тормозного излучения. Радиус плазмы в этот момент  $R \approx 2 \cdot R_0$ , где  $R_0$  – начальный радиус мишени [4].

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}} \quad (17)$$

где  $\rho$  - начальная плотность мишени ( $775 \text{ кг/см}^3$ ), тогда:

$$\tau_0 = \frac{2R_0}{V_i} = 2 \frac{\sqrt[2]{3m_i} \sqrt[3]{3m}}{\sqrt[4]{SE} \sqrt[4]{4\pi\rho}} \quad (18)$$

$$\tau_0^2 = 2 \cdot 10^{10} \frac{m_i \sqrt[5]{m^2}}{S} \quad (19)$$

Анализируя полученные результаты легко заметить, что полная энергия излучения пропорциональна  $S^2$  и  $m^{4/3}$ .

Тормозное излучение имеет сплошной спектр ограниченный частотой

$$\nu_{\max} = \frac{m_e v_e^2}{2h} \quad (20)$$

где  $h$  – постоянная Планка.

Вид спектра приведен на рис.1.

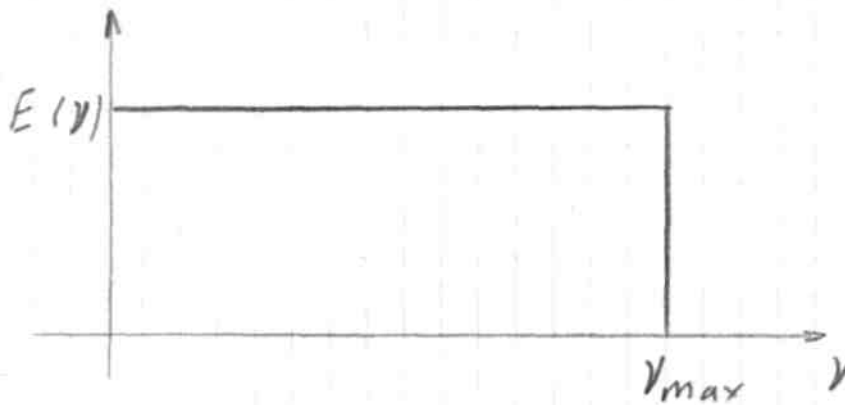


рис 1

## Другие виды излучения

### а) рекомбинационное

Для оценки влияния рекомбинационного излучения проведем следующий числовой расчет.

Поток тормозного излучения из  $1 \text{ см}^3$  плазмы за 1 с равен [3]:

$$q_T = 1,5 \cdot 10^{-27} n_e \sum n_i Z^2 \sqrt{T_e} \quad (21)$$

Аналогичная величина для рекомбинационного излучения [3]:

$$q_R = 5 \cdot 10^{-22} n_e \sum n_i Z^4 \frac{1}{\sqrt{T_e}} \quad (22)$$

$$q_T/q_R = 0,3 \cdot 10^{-5} \frac{\sum n_i Z^2}{\sum n_i Z^4} T_e \quad (24)$$

Для температуры  $10^{10} \text{ }^\circ\text{K}$  величина

$$q_T/q_R \approx 10^4 \quad (23)$$

то есть, рекомбинационным излучением можно смело пренебречь.

### б) излучение черного тела

После расчета числовых характеристик тормозного излучения будет оценен размер плазмы, при котором плазма будет излучать, как черное тело.

### в) синхротронное излучение

Величина и спектр синхротронного излучения будет оценен в другой разработке.

## Расчетная часть.

Рассчитаем величину излучения плазмы при  $\tau_0$ , вычисленному по (18).

$$S = 0,5 ; m = 1 \text{ г.}$$

$$\text{Для лития } \tau_0 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

$$\text{Для гелия } \tau_0 = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

$$\text{Для водорода } \tau_0 = 8 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$$

$$(\text{Li}) E_{\text{изл}} \approx 1 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

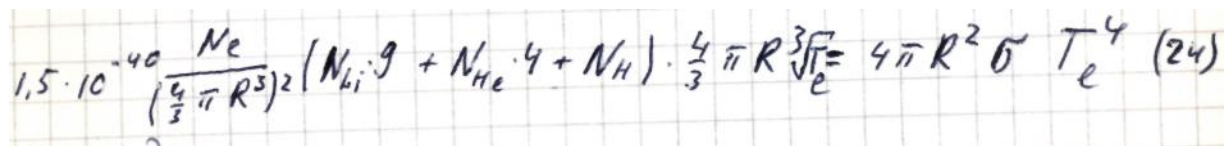
$$(\text{He}) E_{\text{изл}} \approx 0,5 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

$$(\text{H}) E_{\text{изл}} \approx 0,04 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

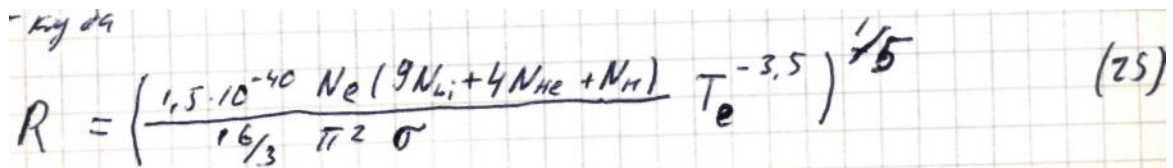
$$\Sigma E_{\text{изл}} \approx 1,5 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

Это составляет приблизительно 0,5% всей энергии, выделившейся в результате реакции. Следовательно, допущение о неизменности температуры является справедливым.

Найдем размеры плазмы, при которых она будет излучать как черное тело. Для этого запишем равенство:


$$1,5 \cdot 10^{-40} \frac{Ne}{(\frac{4}{3} \pi R^3)^2} (N_{Li} \cdot 9 + N_{He} \cdot 4 + N_H) \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \sqrt{\frac{1}{e}} = 4 \pi R^2 \sigma T_e^4 \quad (24)$$

откуда:


$$R = \left( \frac{1,5 \cdot 10^{-40} Ne (9N_{Li} + 4N_{He} + N_H)}{\frac{16}{3} \pi^2 \sigma} T_e^{-3,5} \right)^{1/5} \quad (25)$$

принимая  $S = 0,5 ; m = 1 \text{ г}$ ; получаем  $R \approx 10^{-4} \text{ м}$ , что много меньше минимально возможного радиуса мишени, следовательно плазма как черное тело не излучает.

Максимальная частота излучения (20)

$$\nu_{\text{max}} \approx 3,4 \cdot 10^{20} \text{ Гц,}$$

что соответствует жесткому х-излучению.

Мощность излучения всей двигательной установки при расходе рабочего тела 10 кг/с будет примерно равно  $10^{12} \text{ Вт}$ .

## Вывод

Рассмотрен наихудший (с точки зрения конструирования) вариант излучения. Основная часть излучения приходится на рентгеновский диапазон. Радиаторы следует рассчитывать на  $\sim 10^{10} \text{ Вт}$ . Необходимо рассмотреть теплообмен между частицами после процесса горения.