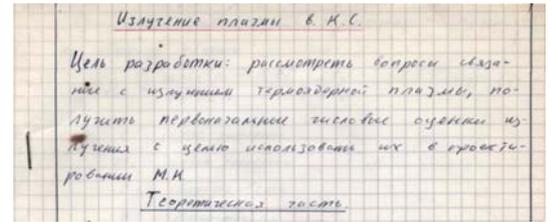


Излучение плазмы в КС



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 Li^{3+} , He^{2+} , H^+ и e^- .

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

1. За счет излучения торможения на 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;

τ – 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;

μ – 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:

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

или после подстановки постоянных:

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

Проинтегрировав выражение (11) по времени получим энергию излучения:

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

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 τ_0 – время начала тормозного излучения. Для определения диапазона изменения времени τ_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 ρ - начальная плотность мишени (775 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.

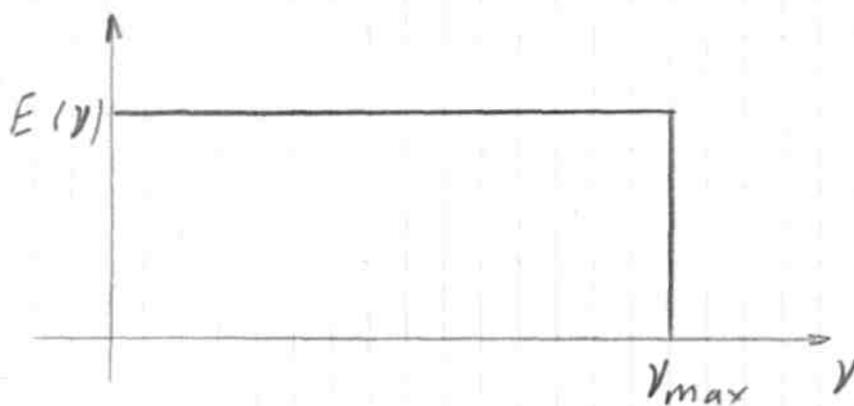


рис 1

Другие виды излучения

а) рекомбинационное

Для оценки влияния рекомбинационного излучения проведем следующий числовой расчет.

Поток тормозного излучения из 1 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 τ_0 , вычисленному по (18).

$$S = 0,5 ; m = 1 \text{ г.}$$

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

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

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

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

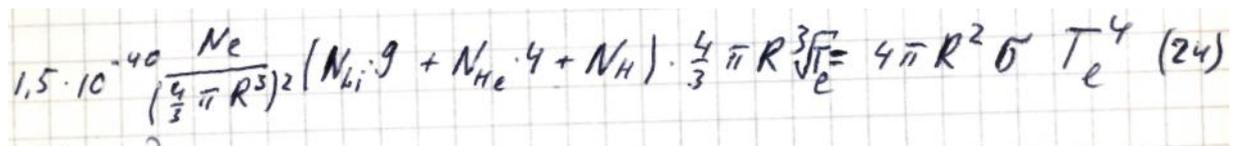
$$(\text{He}) E_{\text{изл}} \approx 0,5 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

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

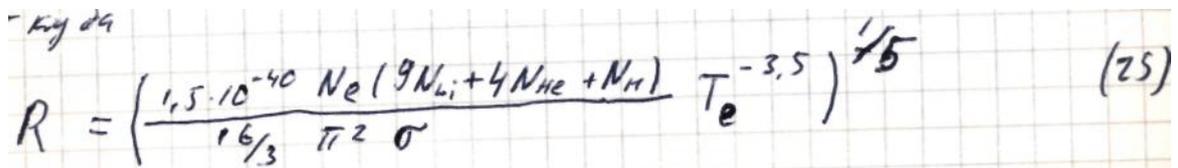
$$\Sigma E_{\text{изл}} \approx 1,5 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

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 $S = 0,5 ; m = 1$ г; получаем $R \approx 10^{-4}$ 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} Вт.

Вывод

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