

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/376649647>

# Исследование режимов термоядерного горения

Article · March 2015

CITATIONS

0

READS

8

2 authors:



[Anton Svetlov](#)

Joint Institute for High Temperatures

10 PUBLICATIONS 10 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[A. Yu. Chirkov](#)

Bauman Moscow State Technical University

92 PUBLICATIONS 415 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

УДК 621.039.6

## Исследование режимов термоядерного горения

*Светлов А.С., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Теплофизика»*

*Научный руководитель: Чирков А.Ю. к.т.н, доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

[\*bauman@bmstu.ru\*](mailto:bauman@bmstu.ru)

### 1. Введение

Актуальность темы связана с необходимостью обеспечения устойчивой работы термоядерного реактора, что необходимо для эффективного производства энергии. Эта задача отвечает современным проблемам в области физики плазмы и энергетики. Устойчивость означает, что при отклонении от номинального рабочего режима, связанном с небольшими изменениями параметров, система стремится восстановить начальное состояние. В данной работе рассматривалось влияние изменения таких параметров, как температура плазмы  $T$ , концентрация плазмы  $n$  и размер плазменного шнура  $a$  (малый радиус тора). При исследовании их изменения мы получаем определенные зависимости составляющих баланса энергии. Анализ суммарной мощности источников энергии и потерь позволяет определить области, в которых термоядерное горение будет находиться в устойчивом состоянии, то есть баланс будет регулироваться самой плазмой в процессе горения.

В настоящей работе исследуется тепловая устойчивость режимов термоядерного горения дейтериево-тритиевой плазмы в реакторах с параметрами близкими к ITER [1, 2].

Тепловая устойчивость означает, что при заданной мощности внешнего нагрева отклонение параметров от номинальных значений не должны приводить к неограниченному разогреву плазмы или наоборот ее охлаждению. Устойчивыми считаются режимы с такими сочетаниями параметров, при небольших изменениях которых система стремится сохранить исходное состояние равновесия.

Анализ выполнен на основе уравнения энергобаланса плазмы. Рассматривается динамика изменения полной энергии плазмы при вариациях следующих параметров: температуры плазмы  $T$ , концентрация плазмы  $n$  и размер плазменного шнура  $a$ .

## 2. Баланс энергии

В плазме протекает термоядерная реакция



где D – дейтерий, T – тритий, n – нейтрон,  ${}^4\text{He}$  – альфа-частица.

Стационарному режиму горения соответствует баланс энергии, в котором разность мощности источников и потерь равняется нулю [3]:

$$(1 - f_{fast})(P_{fus} - P_n) + P_{aux} - P_{rad} - \frac{W_{th}V}{\tau_E} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $P_{fus}$  – полная термоядерная мощность,  $P_n$  – мощность в нейтронах ( $0,8P_{fus}$ ),  $f_{fast}$  – относительные потери заряженных продуктов реакции (принято 0,05 как в ITER),  $P_{aux}$  – мощность внешнего нагрева,  $P_{rad}$  – мощность радиационных потерь (учитывается только тормозное излучение),  $W_{th}$  – тепловая энергия плазмы,  $V$  – объем плазмы,  $\tau_E$  – время удержания энергии плазмы.

Термоядерная мощность

$$P_{fus} = n_D n_T \langle \sigma v \rangle E_{fus} V, \quad (3)$$

где  $n_D$  и  $n_T$  – концентрации ядер дейтерия и трития;  $E_{fus}$  – энергия, выделяющаяся в реакции; скорость D–T-реакции в м<sup>3</sup>/с вычисляется по формуле [3]

$$\langle \sigma v \rangle \approx 1.1 \cdot 10^{-24} T_i^2, \quad (4)$$

где температура ионов  $T_i$  в килоэлектронвольтах.

Объем тороидальной плазмы

$$V \approx 2\pi^2 a^3 A k, \quad (5)$$

где  $a$  – малый радиус тора,  $A$  – аспектное отношение,  $k$  – вытянутость сечения.

На рис. 1–3 представлены графики зависимости термоядерной мощности в заряженных частицах от основных параметров.

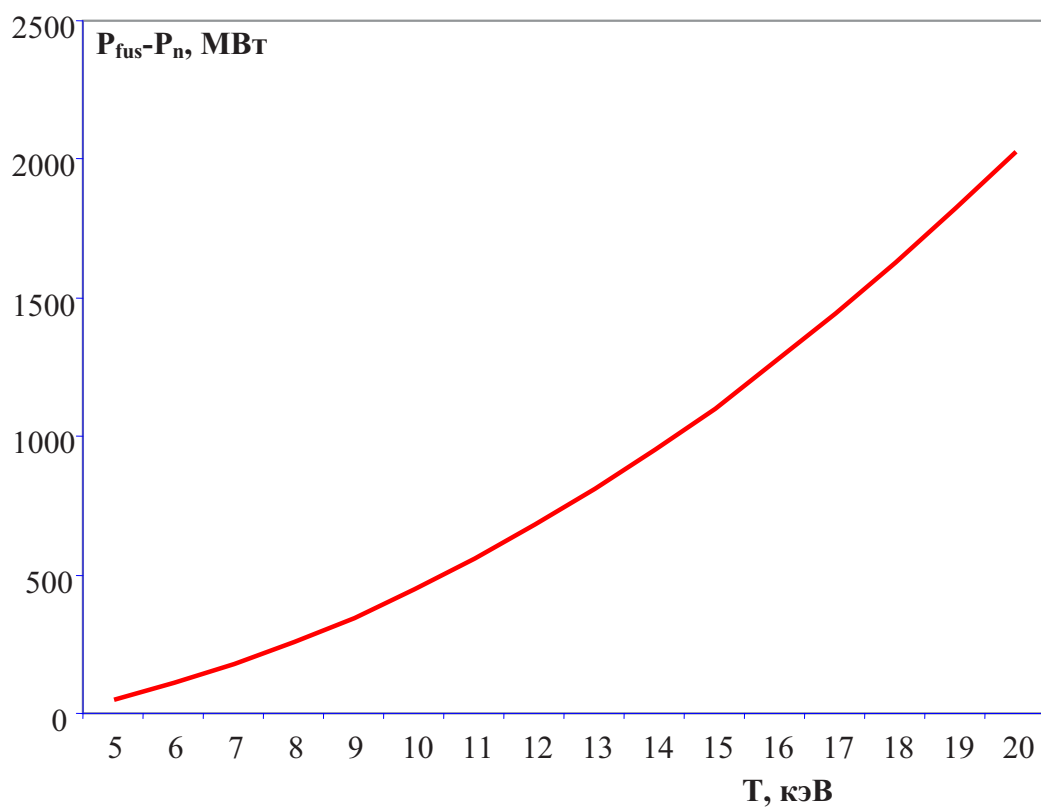


Рис. 1. Зависимость мощности от температуры плазмы  $T$

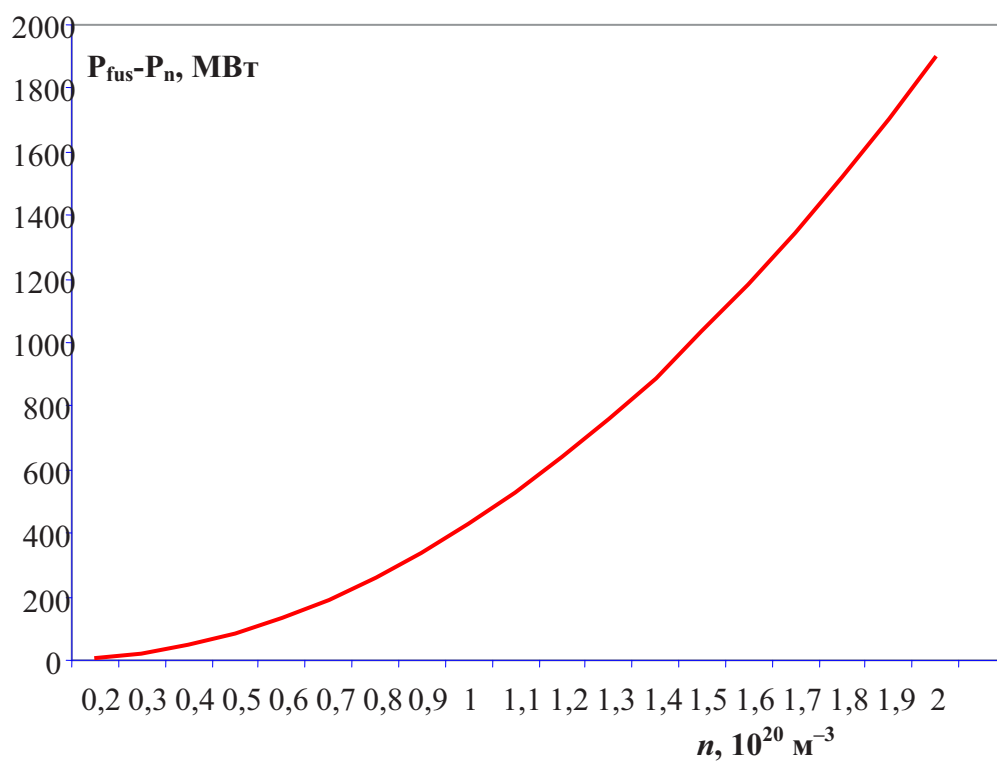


Рис. 2. Зависимость мощности от концентрации плазмы  $n$

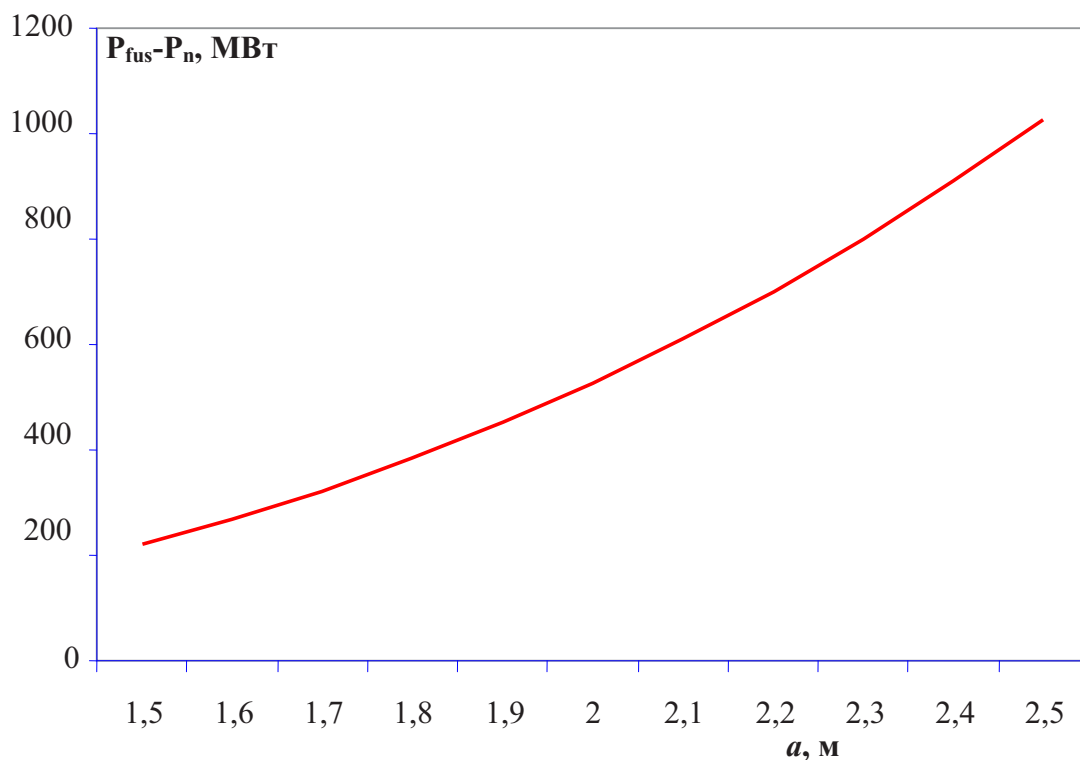


Рис. 3. Зависимость мощности от размера плазменного шнура  $a$

Потери на тормозное излучение

$$P_{br} \approx 8.5 C_{br} Z_{eff}^2 n_e^2 \sqrt{\frac{T_e}{511}} V, \quad (6)$$

где  $C_{br}=1.34 \cdot 10^{-36}$ ;  $n_e$  – концентрация электронов;  $Z_{eff}^2 = \frac{Z_1^2 n_1 + Z_2^2 n_2 + \dots}{n_e}$ ;  $Z_1, Z_2, \dots$  –

заряды ионов;  $n_1, n_2, \dots$  – концентрации ионов;  $T_e$  – температура в килоэлектронвольтах.

На рис. 4–6 представлены графики зависимости потерь тормозного излучения от рассматриваемых параметров.

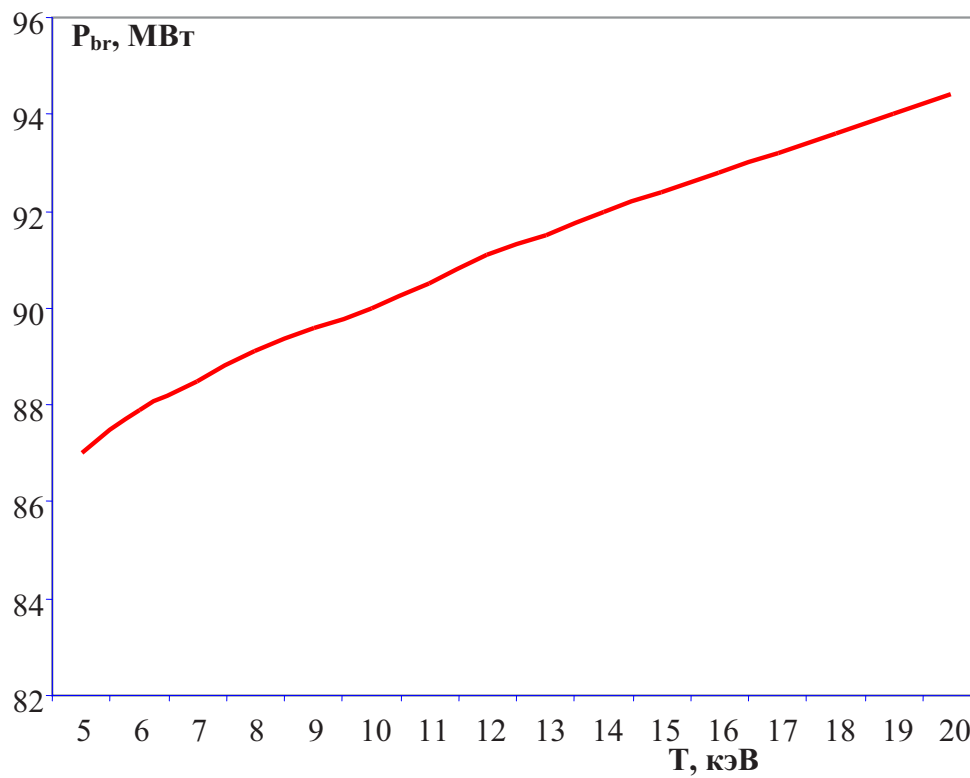


Рис. 4. Зависимость мощности тормозного излучения от температуры плазмы  $T$

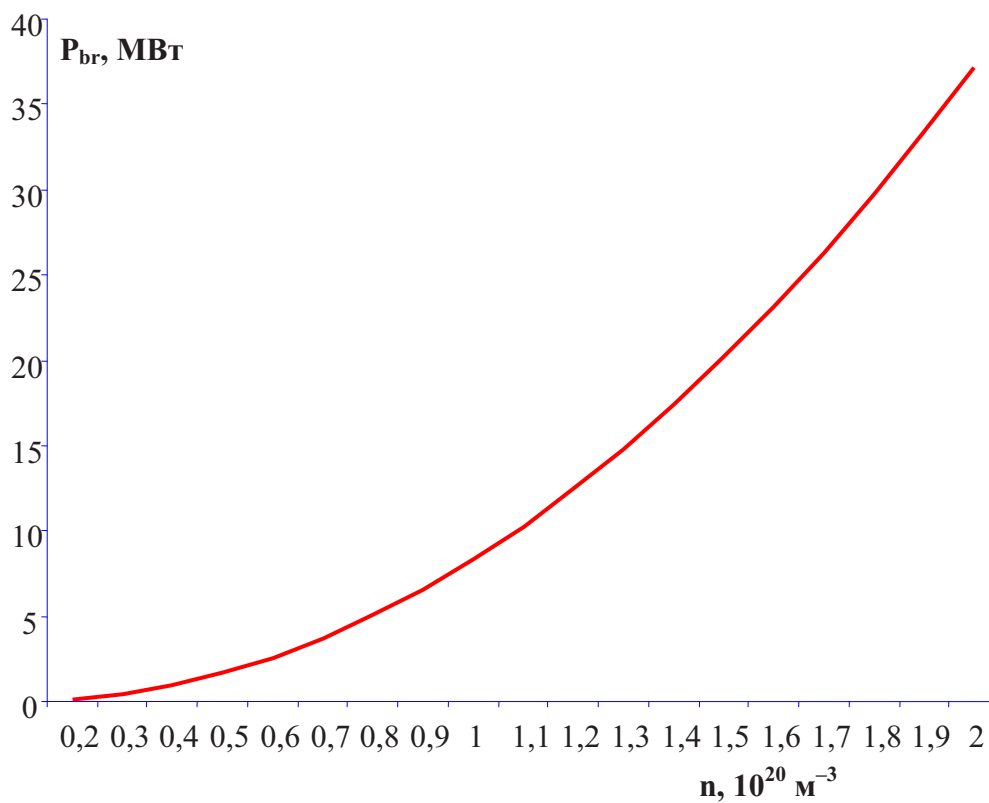


Рис. 5. Зависимость мощности тормозного излучения от концентрации плазмы  $n$

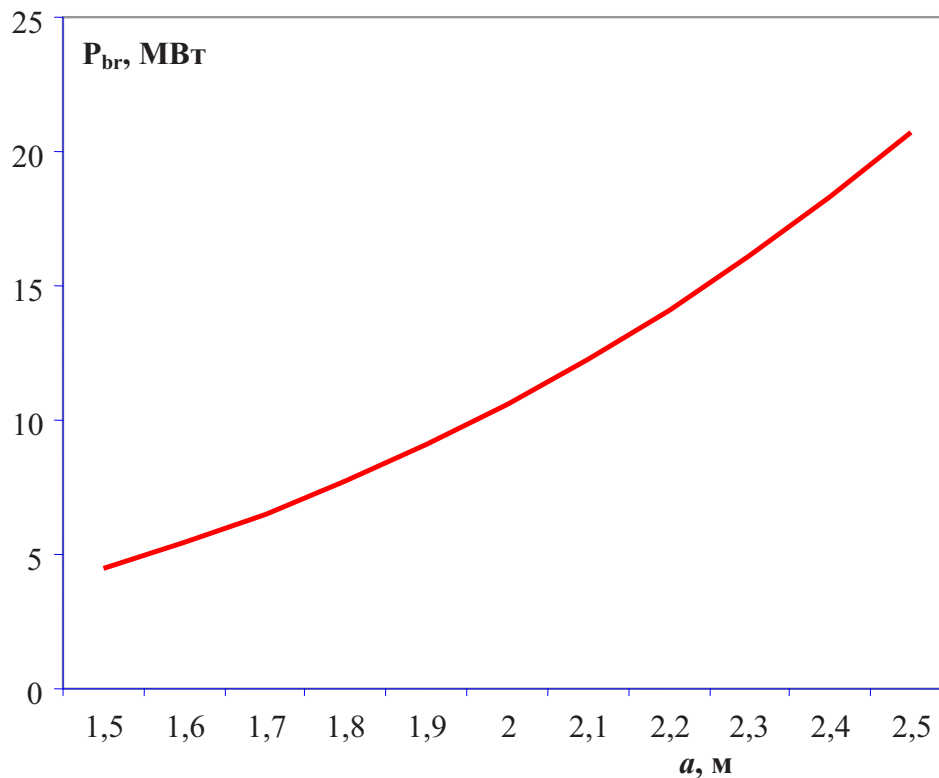


Рис. 6. Зависимость мощности тормозного излучения от размера плазменного шнура  $a$

Тепловая энергия плазмы

$$W_{th} = \left( \sum_i \frac{3}{2} n_i k T_i + \frac{3}{2} n_e k T_e \right) V \quad (7)$$

где  $n_i = n_D = n_T = n$ , концентрация электронов  $n_e = n_D + n_T + Z_{imp} n_{imp} \approx 2n$ , где  $Z_{imp}$  и  $n_{imp}$  – заряд и концентрация примесей (их количество по сравнению с другими концентрациями мало).

Кроме ионов дейтерия и трития в плазме присутствуют в небольшом количестве альфа-частицы, а также могут присутствовать примеси. В нашем анализе концентрациями альфа-частиц и примесей пренебрегаем. Радиационные потери на примесях учитываем в значении эффективного заряда  $Z_{eff}^2 = 1.7$ .

На рис. 7–9 представлены графики изменения тепловой энергии плазмы в зависимости от изменения рассматриваемых параметров.

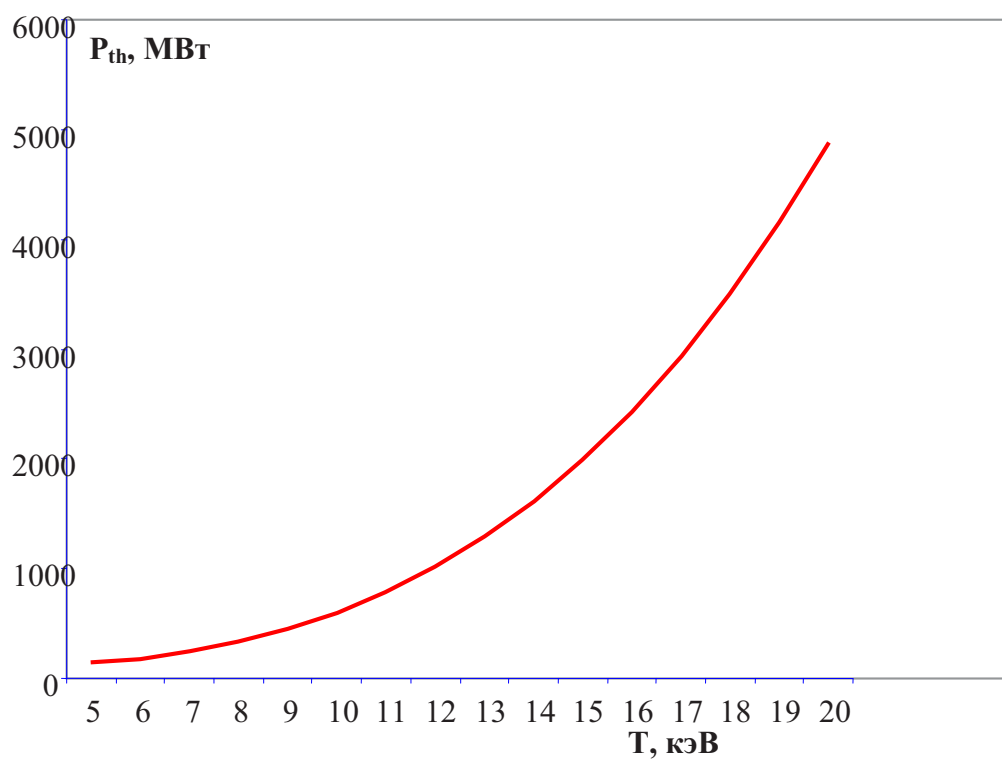


Рис. 7. Зависимость тепловой энергии плазмы от температуры  $T$

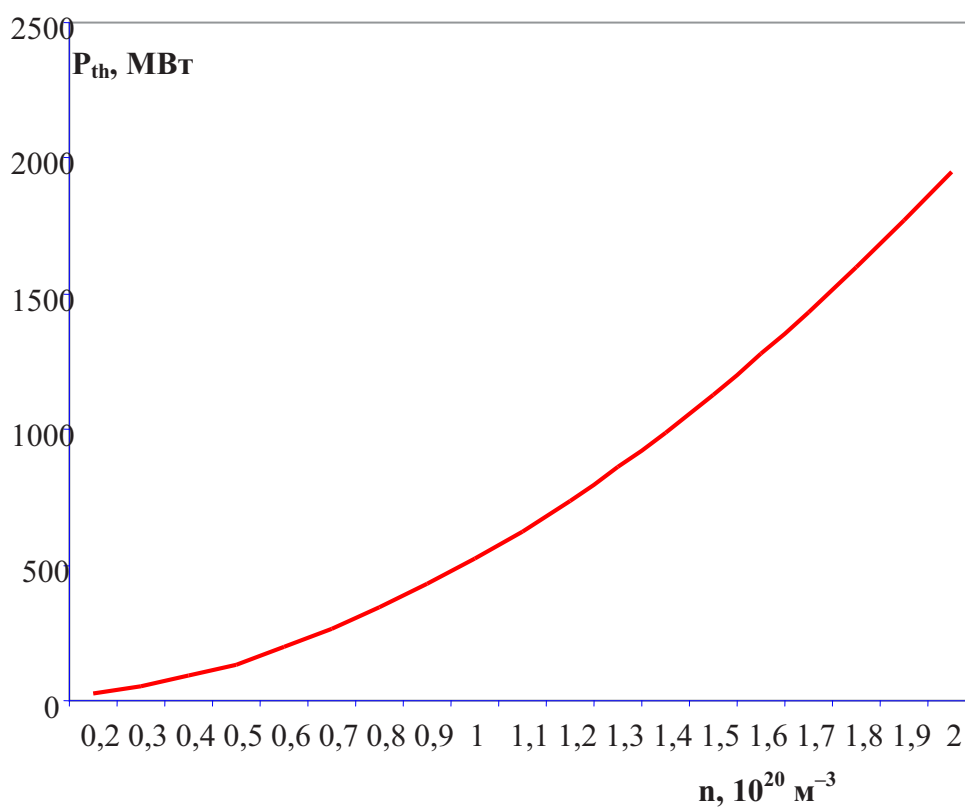


Рис. 8. Зависимость тепловой энергии плазмы от концентрации  $n$



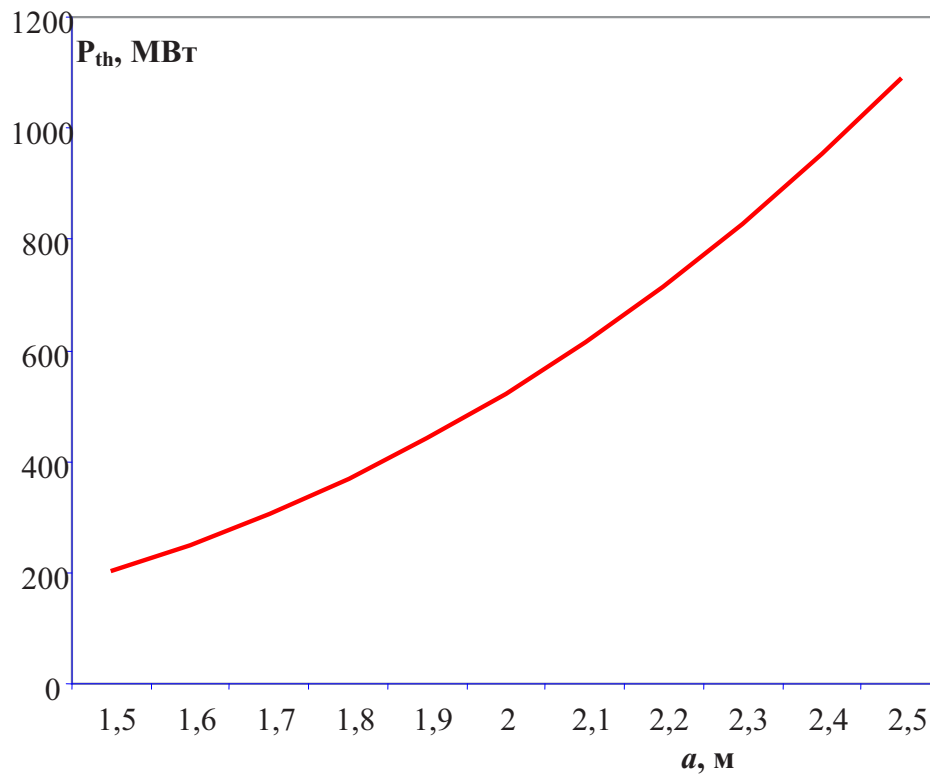


Рис. 9. Зависимость тепловой энергии плазмы от размера плазменного шнура  $a$

Для анализа энергобаланса плазмы в токамаке используем методику интегрального расчета [4--6]. Рассматриваем изотермическую плазму  $T_i = T_e = T$ . Для времени удержания используем скейлинг ITER98y2, из которого выразим время удержания в виде

$$\tau_E = 1.2 \cdot 10^{16} \frac{x_e^{1.3}}{x_s^{2.2}} \frac{I^3 B^{0.5} M^{0.6} A^{2.3} k^{0.3}}{n^{0.9} T^{2.2} a^{0.3}} \quad (8)$$

Зависимости  $\tau_E$  от параметров представлены на рис. 10–12.

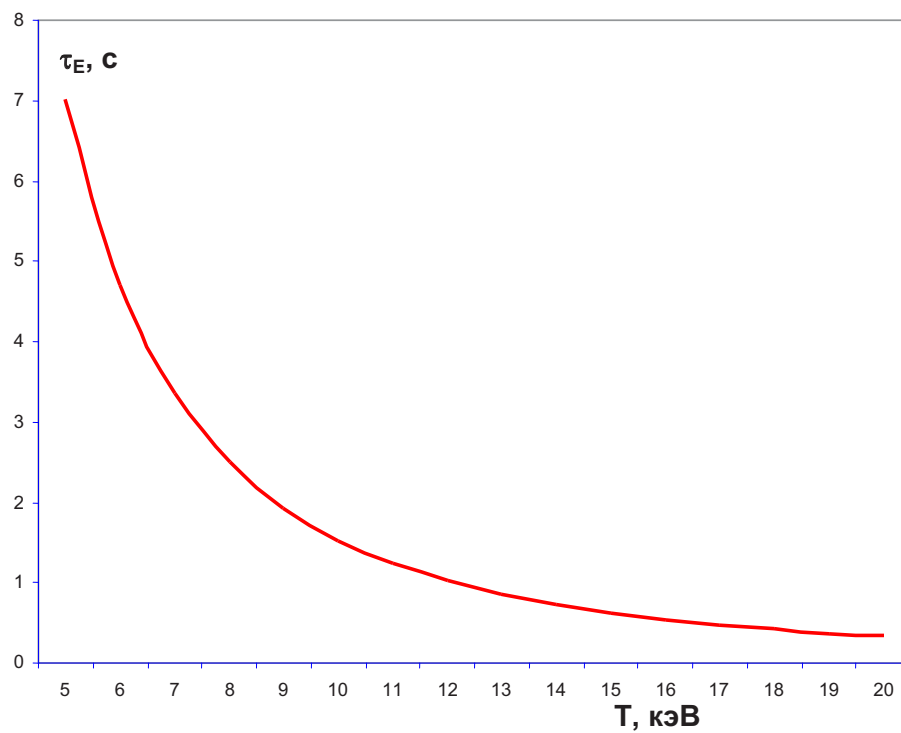


Рис. 10. Зависимость времени удержания плазмы от температуры  $T$

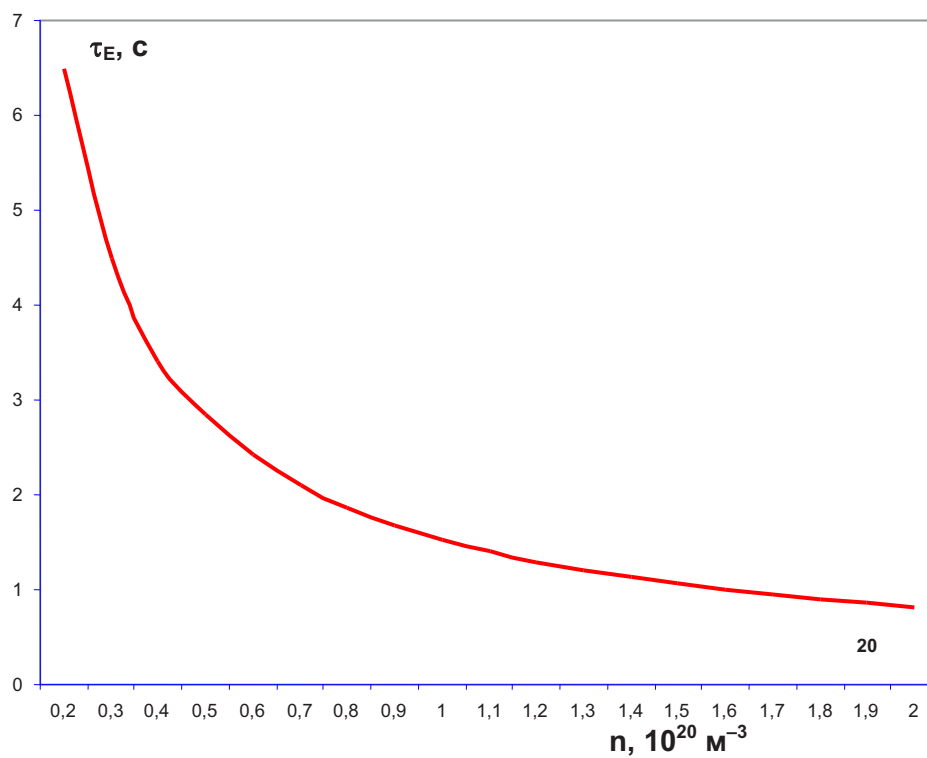


Рис. 11. Зависимость времени удержания плазмы от концентрации  $n$

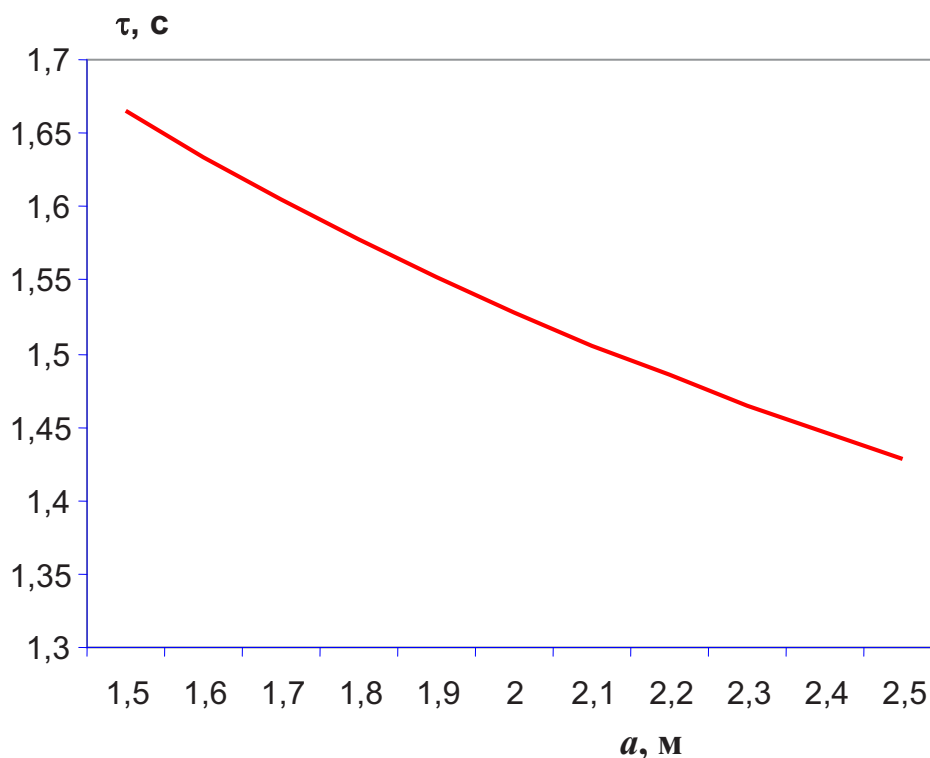


Рис. 12. Зависимость времени удержания плазмы от размера плазменного шнура  $a$ .

### 3. Исследование на устойчивость

При отклонении параметров  $T$ ,  $n$  или  $a$  от состояния равновесия рассмотрим уравнение

$$\frac{dW_{th}}{dt} = (1 - f_{fast})(P_{fus} - P_n) + P_{aux} - P_{rad} - \frac{W_{th}V}{\tau_E}. \quad (9)$$

Задача анализа сводится к уравнению такого вида:

$$\frac{dx}{dt} = f(x), \quad (10)$$

где  $x$  – одна из варьируемых величин.

Стационарный режим соответствует условию  $\frac{dx}{dt} = 0$ . Следовательно, стационарное решение  $x_0$  находится из уравнения  $f(x_0)=0$ .

При рассмотрении влияния возмущения полагают

$$x = x_0 + x_1, \quad (11)$$

где  $x_0 = \text{const}$ ,  $x_1$  – возмущение. Подставив в уравнение (10) получим

$$\frac{dx_1}{dt} = f(x_0 + x_1) \approx f(x_0) + \frac{df}{dx} x_1. \quad (12)$$

Учтем что  $f(x_0)=0$ , тогда

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{df}{dx} x_1. \quad (13)$$

Из уравнения (13) видно, что если  $\frac{df}{dx} > 0$ , то возмущение  $x_1$  нарастает. Если  $\frac{df}{dx} < 0$ , то возмущение  $x_1$  затухает. В первом случае  $x_0$  является неустойчивым решением, во втором случае – устойчивым.

Так как тепловая энергия  $W_{th}$  является возрастающей функцией положительных величин  $T$ ,  $n$  и  $a$ , то для устойчивости необходимо чтобы

$$\frac{dW_{th}}{dt} < 0. \quad (14).$$

Исследуем правую часть уравнения (9) на выполнение условия  $\frac{dW_{th}}{dt} < 0$ .

Правая часть в (9) равна

$$F = (1 - f_{fast})(P_{fus} - P_n) + P_{aux} - P_{rad} - \frac{W_{th}V}{\tau_E}, \quad (15)$$

и она должна убывать при возрастании  $T$ ,  $n$  и  $a$ .

Так как тепловая энергия, стоящая под знаком производной в левой части нестационарного баланса (9), является положительной возрастающей функцией рассматриваемых параметров, то для анализа устойчивости необходимо рассмотреть производные правой части  $F$  по соответствующим параметрам. Устойчивым решениям соответствуют отрицательные производные. Это означает, что для выполнения условий устойчивости в окрестностях рабочей точки исследуемая функция  $F$  должна убывать.

#### 4. Результаты анализа

На рис. 13–15 представлены графики зависимости суммы всех составляющих баланса от рассматриваемых параметров.

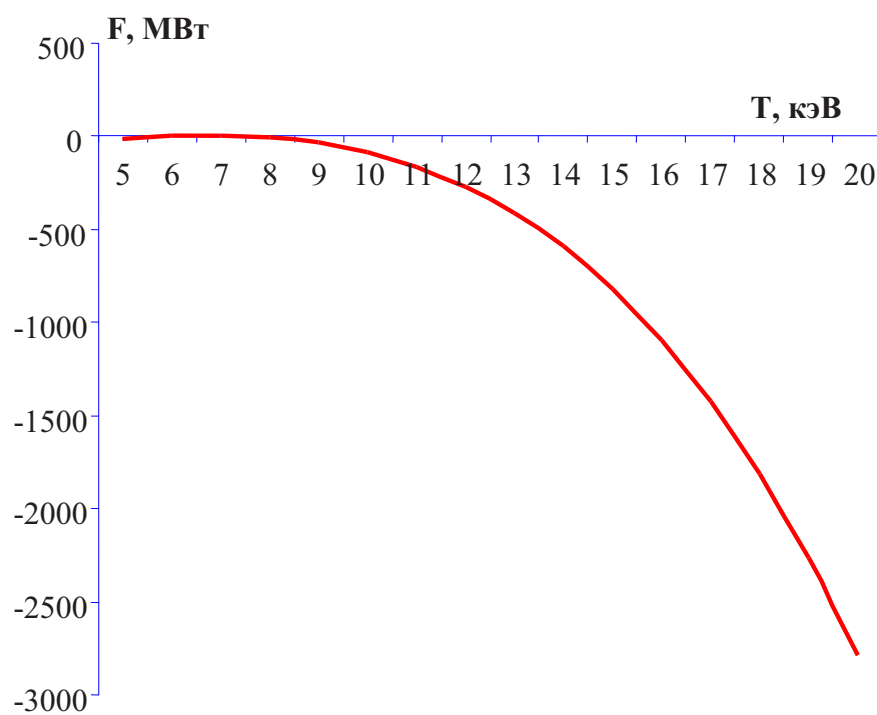


Рис. 13. Зависимость суммы всех составляющих баланса от температуры  $T$

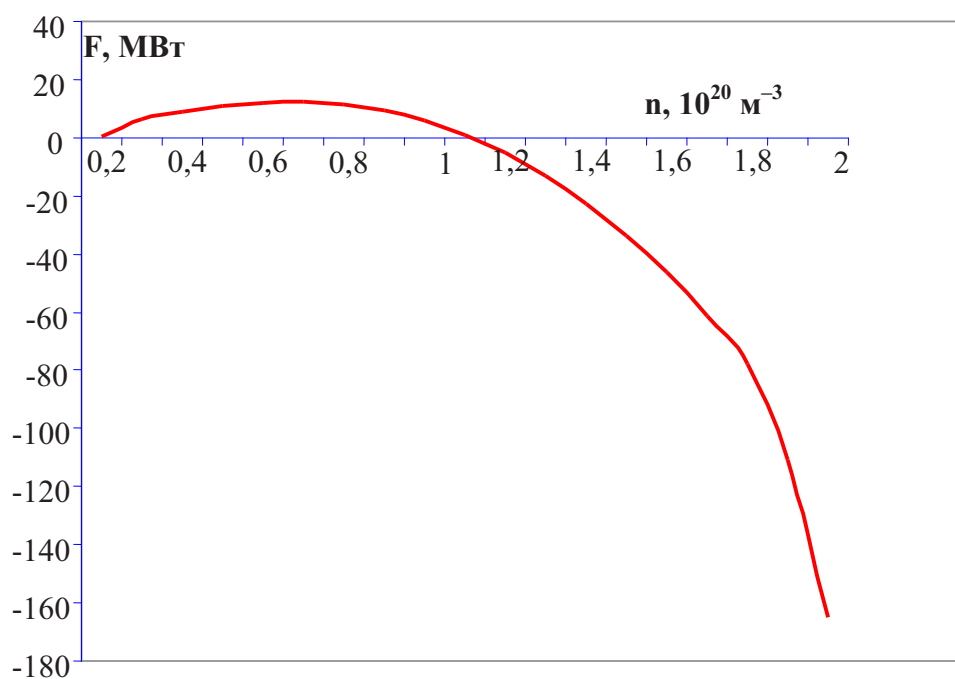


Рис. 14. Зависимость суммы всех составляющих баланса от концентрации  $n$

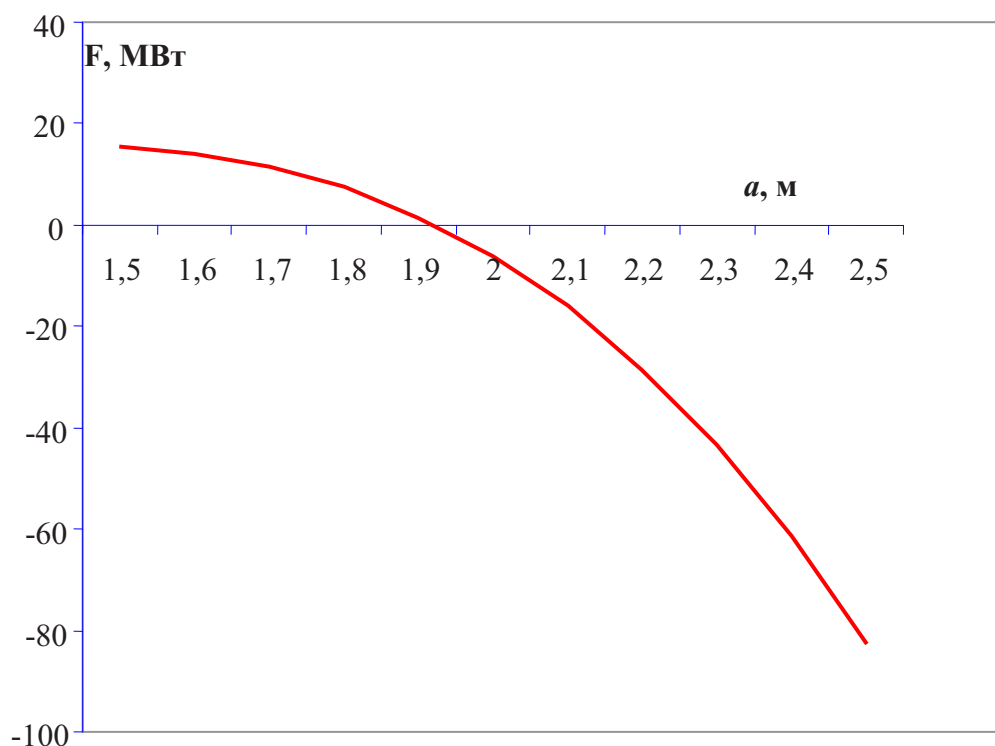


Рис. 15. Зависимость суммы всех составляющих баланса от размера плазменного шнура  $a$

Как можно видеть на рис. 13 и 14, неустойчивые режимы в принципе возможны, но они далеки от рабочей точки ITER.

## 5. Выводы

1. В результате исследования режимов термоядерного горения плазмы в токамаке при параметрах, близких к рабочим режимам ITER, была показана их устойчивость по отношению к флуктуациям температуры, концентрации плазмы и радиуса плазменного шнура.
2. Также показано существование области параметров, в которой горение может быть неустойчиво, что представляет определенную важность с точки зрения рабочих режимов будущих термоядерных реакторов.
3. В результате были развиты методы анализа устойчивости термоядерного горения плазмы, основанные на исследовании энергобаланса с учетом основных процессов энергообмена. Были также разработаны средства расчета (программы) соответствующих режимов.
4. Разработанные методики и расчетные средства, а также полученные в ходе исследования данные могут быть в дальнейшем использованы для исследования

энергобаланса и анализа устойчивости термоядерного горения в различных системах, в том числе и при использовании термоядерного топлива различного состава [7].

### Список литературы

1. Миямото К. Основы физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. М.: Физматлит, 2007. 424 с.
2. Чирков А.Ю. О термоядерном реакторе на основе сферического токамака // Журнал технической физики. 2006. Т. 76, № 9. С. 51–54.
3. Чирков А.Ю. Малорадиоактивный термоядерный реактор на основе сферического токамака с сильным магнитным полем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 3. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/167577.html> (дата обращения: 04.03.2014)
4. Chirkov A.Yu. Low radioactivity fusion reactor based on the spherical tokamak with a strong magnetic field // Journal of Fusion Energy. 2013. V. 32. No. 2. P. 208–214.
5. Чирков А.Ю. Энергетическая эффективность альтернативных термоядерных систем с магнитным удержанием плазмы // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4. № 11–12. С. 1050–1059.