

Локальная плазма ядра + оболочка» и Импульсный/управляемый термоядерный синтез

Эмил Андреев

9 февраля 2026 г.

Аннотация

Предлагается экспериментальная установка для изучения нового режима плазмы, в котором центральное горячее ядро стабилизируется внешней плазменной оболочкой. Ядро формируется импульсным сжатием и удерживается давлением оболочки, а не магнитным полем. Основная цель — измерение временного профиля температуры, давления и плотности ядра, а также транспортных свойств плазмы. Отличие от существующих подходов (ITB, pellet heating, MTF) заключается в многослойной импульсной структуре, воспроизводимости и длительном времени жизни ядра относительно импульса.

Ключевые слова: термоядерная плазма, локальное ядро, импульсное сжатие, многослойная плазма, transport coefficients

1 Введение

Современные исследования плазмы включают Internal Transport Barriers (ITB), локальное нагревание с помощью пеллетов и Magnetized Target Fusion (MTF). Эти подходы создают горячие зоны, но не обеспечивают контролируемое стабильное ядро с оболочкой, как предложено в данной работе. Отличие проекта заключается в целенаправленном формировании ядра 2% от объема, удерживаемого оболочкой, с импульсным контролем температуры и давления, что обеспечивает новый экспериментальный режим.

2 Экспериментальная установка

2.1 Камера и магниты

Цилиндрическая камера: радиус 0.4 м, высота 1 м, вакуум $<10^{-3}$ Торр.
Внешнее магнитное поле 3–5 Т удерживает оболочку.

2.2 Плазма: ядро и оболочка

- Радиус ядра: 0.008 м (2% объема)
- Радиус оболочки: 0.008–0.4 м
- Температура ядра: 1–5 keV
- Температура оболочки: 0.1–0.5 keV
- Давление ядра: 10–50 кПа
- Давление оболочки: 5–10 кПа

2.3 Импульсный драйвер и диагностика

Энергия импульса: 1–3 МДж, длительность 0.5–5 нс. Диагностика: Thomson scattering, interferometry, B-field probes, опционально нейтроны.

3 Расчеты и параметры

4 Схема: физическая суть

Многослойная плазма

[магнитное удержание]

[холодная плазма] ← оболочка (теплоотвод, давление)

[горячая плазма] ← переходный слой

[плотное ядро (2%)] ← зона реакции

Ключевая идея

Реакция идёт в тонком слое ядра.

Оболочка:

- отводит тепло
- создаёт давление
- стабилизирует температуру

Магнитное поле удерживает только оболочку, не ядро.

5 Модель многослойной плазмы (приближённая)

Сделаем осесимметричную радиальную модель.

Геометрия

Пусть:

- радиус всей плазмы: R
- радиус ядра:

$$r_c = 0.27R \quad (\text{объём} \approx 2\%)$$

так как

$$\left(\frac{r_c}{R}\right)^3 \approx 0.02$$

Плотности

Типичные параметры для реакции D–T.

Ядро:

$$n_c \sim 10^{22} \sim 10^{23} \text{ м}^{-3}$$

$$T_c \sim 15 \sim 25 \text{ кэВ}$$

Оболочка:

$$n_s \sim 10^{20} \sim 10^{21} \text{ м}^{-3}$$

$$T_s \sim 3 \sim 7 \text{ кэВ}$$

В оболочке реакция практически не идёт, т.к.

$$\langle \sigma v \rangle \ll 10^{-24}$$

Условие давления

Для устойчивости:

$$P_c = P_s$$
$$n_c k T_c = n_s k T_s$$

Отсюда:

$$\frac{n_c}{n_s} = \frac{T_s}{T_c}$$

Подставим:

$$\frac{n_c}{n_s} \approx \frac{5}{20} = 0.25$$

Ядро:

- горячее
- менее плотное, чем оболочка

Где идёт реакция

Скорость реакции:

$$R \propto n^2 \langle \sigma v \rangle (T)$$

Даже при меньшей плотности ядра резкий рост

$$\langle \sigma v \rangle$$

при 15~25 кэВ даёт локализацию реакции в ядре.

Толщина активного слоя:

$$\Delta r \sim 0.05 \sim 0.1 r_c$$

Реакция идёт не в центре, а в тонкой сферической зоне.

Тепловая стабилизация

Баланс энергии ядра:

$$P_{\text{fusion}} = P_{\text{conduct}} + P_{\text{radiation}}$$

При росте температуры:

- теплопроводность в оболочку \uparrow
- излучение \uparrow

Ядро само ограничивает температуру. Это отрицательная обратная связь, которой нет в токамаке.

Как выглядит «горение», а не вспышка

В этой схеме:

- топливо подводится диффузией
- реакция не мгновенная, не объёмная, а поверхностная
- ядро не прогорает сразу

Это не «разогрев плазмы», а режим управляемого горения.

6 ВЫЗОВЫ

1. Формирование ядра требует сверхбыстрого импульсного сжатия
время: наносекунды–микросекунды
2. Подавление гидродинамических неустойчивостей Релея–Тейлора дрейфовых мод
3. Согласование импульсного и магнитного режимов

Это гибрид ICF + MCF

7 Минимальные импульсные энергии для формирования ядра

Исходные допущения

Берём D–T.

Геометрия:

$$R = 1 \text{ м}$$

$$r_c = 0.27R \approx 0.27 \text{ м}$$

Объём ядра:

$$V_c = \frac{4}{3}\pi r_c^3 \approx 0.082 \text{ м}^3$$

Параметры ядра

$$T_c \approx 15 \text{ кэВ} \approx 1.7 \times 10^8 \text{ К}$$

$$n_c \approx 5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$$

Энергия формирования

$$E = \frac{3}{2}nkTV$$

$$E_c \approx 1.4 \times 10^6 \text{ Дж}$$

Работа сжатия

$$P_c \approx 1.2 \times 10^7 \text{ Па}$$

$$W \sim 8 \times 10^5 \text{ Дж}$$

$$E_{\text{imp}} \sim 2 \sim 3 \text{ МДж}$$

7.1 Объем и плотность

Объем ядра:

$$V_{\text{core}} = \frac{4}{3}\pi R_{\text{core}}^3 \approx 2.14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Плотность: $n_{\text{core}} \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

7.2 Энергия ядра

Средняя энергия электронов:

$$E_{\text{core}} = \frac{3}{2}nk_B T \cdot V \approx 3.14 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$$

(для $T = 5 \text{ keV}$)

7.3 Временные масштабы

Длительность импульса: 0.5–5 $\mu\text{с}$, ожидаемое время жизни ядра: $\tau_{\text{core}} 1000 \cdot \tau_{\text{pulse}}$

8 Таблица параметров

9 Отличие от существующих проектов

- Многослойное импульсное сжатие с формированием ядра 2% от объема

Система	Параметр	Ядро	Оболочка
Радиус	м	0.008	0.4
Температура T_e , keV		1–5	0.1–0.5
Плотность n , м^{-3}		$5 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{19}$
Давление, кПа		10–50	5–10
Магнитное поле, Т		0	3–5

Таблица 1: Основные параметры ядра и оболочки

- Удержание ядра за счет давления оболочки, а не магнитного поля
- Контроль температуры и давления импульсно с воспроизводимостью
- Новый экспериментальный режим локализованного ядра с длительным временем жизни

10 Введение и обзор литературы

Современные исследования термоядерного синтеза в импульсных установках разделяются на несколько направлений: формирование горячих зон в объёме с помощью слияния плазменных струй (Plasma Liner), токовые сжатия (Z-Pinch) и магнитно-инициализируемый синтез с импульсным сжатием (Magnetized Target Fusion, MTF). Основной проблемой большинства существующих схем является быстрое прогорание всей плазмы и ограниченная возможность контролируемого горения локальных зон [Hsu2018ENG, PLXDiagnosics].

В Plasma Liner (PLX) формируются гиперзвуковые плазменные струи, которые сливаются и создают сферически импульсное сжатие. Как показано в [PLXjets2020], экспериментальные данные демонстрируют значительные неравномерности плотности и ограниченное время стабильного горения ядра. Аналогичные ограничения наблюдаются и в Z-Pinch установках, где высокая энергия сжатия сопровождается сильными магнитными неустойчивостями и ограниченной продолжительностью импульса [Hsu2018ENG].

MTF сочетает магнитное удержание с импульсным сжатием, что позволяет несколько увеличить время удержания плазмы, однако контроль температуры и плотности локального ядра остаётся проблематичным [SemiAnalytic2016]. Существующие схемы в основном ориентированы на

одновременное нагревание и сжатие всего объёма плазмы, что препятствует постепенному и контролируемому горению.

В отличие от этих подходов, предложенная схема формирует ****локальное ядро (2% объёма плазмы)****, которое стабилизируется ****внешней плазменной оболочкой****. Оболочка удерживается магнитным полем и играет роль термостабилизатора, снижая теплотери и поддерживая температуру ядра в течение импульса. Такой подход позволяет осуществлять ****многоступенчатое импульсное сжатие****, управлять плотностью и температурой ядра, а также продемонстрировать стабильное локальное горение, недостижимое в Plasma Liner, Z-Pinch или классическом МТФ.

Предложенная концепция открывает новое направление в термоядерных исследованиях и может быть экспериментально проверена на подмасштабных установках, с постепенной накачкой энергии и контролем давления оболочки. Результаты этого исследования будут актуальны для разработки гибридных схем термоядерного синтеза с импульсным и магнитным удержанием.

Список литературы

J. Wesson, *Токамаки*, М.: Мир, 2004.

ITER Organization, *Основные технологии и проект токамака ITER*, 2018.

M. Cuneo et al., *Эксперименты с Z-пинч плазмой и локальным нагревом*, Журнал плазменной физики, 2010.

R. Slutz et al., *Magnetized Target Fusion: обзор экспериментов и моделей*, Журнал термоядерной физики, 2007.

A. Izzo et al., *Локальный нагрев плазмы с помощью пеллет*, Fusion Science and Technology, 2015.

T. Fujita et al., *Internal Transport Barriers in Tokamak Plasmas*, Nucl. Fusion 43, 2003.