



# Токамак Т-15МД: задачи и новые экспериментальные результаты

Н.А.Кирнева

от имени коллектива Т-15МД

НИЦ «Курчатовский институт»



# Авторский коллектив

Анашкин И.О., Андреев В.Ф., Аристов А.И., Асадулин Г.М., Ахмедов Э.Р., Ахтырский С.В., Балашов А.Ю., Баркалов Е.Е., Баркалов К.Е., Бегишев Р.А., Белов А.М., Борщеговский А.А., Вершков В.А., Горбунов А.В., Горшков А.В., Грашин С.А., Губанова А.И., Длугач Е.Д., Дремин М.М., Дрозд А.С., Дубиницкий А.Ф., Евсеев А.В., Елисеев Л.Г., Земцов И.А., Изарова А.Д., Карпов А.В., Касьянова Н.В., Кирнева Н.А., Кислов Д.А., Коньков А.Е., Коренев П.С., Крупин В.А., Крылов С.В., Куянов А.Ю., Левин И.В., Лукаш В.Э., Лутченко А.В., Мельников А.В., Мустафин Н.А., Мялтон Т.Б., Недбайлов К.О., Немец А.Р., Неудачин С.В., Новиков В.Н., Ноткин Г.Е., Образцов И.С., Панасенков А.А., Панфилов Д.С., Пименов И.С., Ржевский А.С., Rogozin К.А., Рой И.Н., Рыжаков Д.В., Саранча Г.А., Сарычев Д.В., Саврухин П.В., Сергеев Д.С., Смирнов В.В., Соловьев Н.А., Сушков А.В., Сычугов Д.Ю., Тарасян К.Н., Тепикин В.И., Толпегина Ю.И., Уласевич Д.Л., Хайрутдинов Р.Р., Храменков А.В., Храпов А.А., Хвостенко А.П., Хвостенко П.П., Черкасов С.В., Чистяков П.Ю., Чудеснов А.И., Шелухин Д.А., Шестаков Е.А.





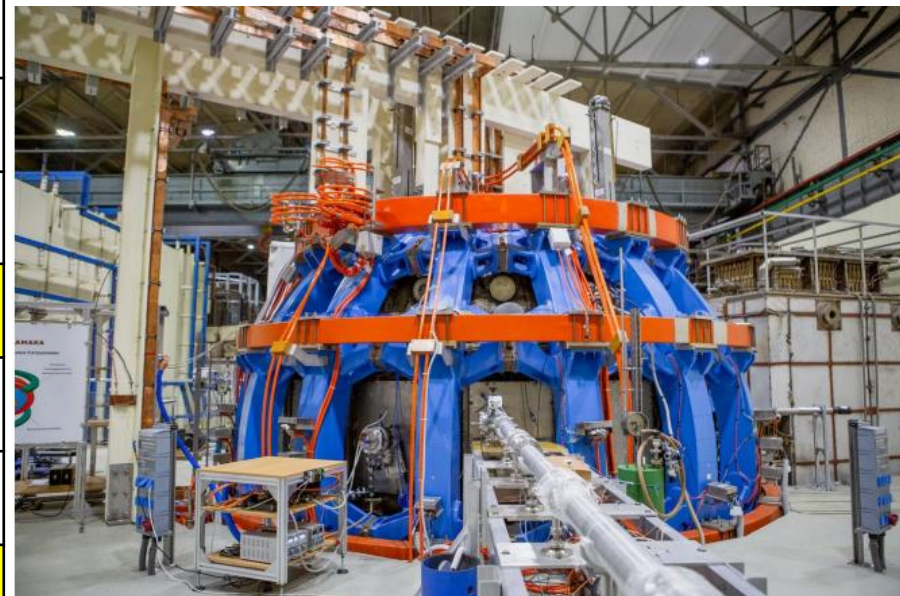
# План доклада

- **Параметры и цели Т-15МД**
- **Научная программа и «инструменты» для ее реализации**
- **Новые экспериментальные результаты**
  - **Расширение области рабочих параметров**
  - **Начало физических исследований**
  - **Развитие диагностик**
- **Заключение**



# Токамак Т-15МД

Ток плазмы, МА	2
Большой радиус, м	1.48
Малый радиус, м	0.67
Аспектное отношение	2.2
Вытянутость	до 1.9
Треугольность	до 0.4
Тороидальное магнитное поле, Тл	2.0
Длительность импульса, с	10
Дополнительный нагрев, МВт ЕСRH/ NBI/ LH/ ICRH	24 8/6/4/6
Плотность, $10^{20} \text{ м}^{-3}$	1
Запас потока, Вб	6
Рабочий газ	Н

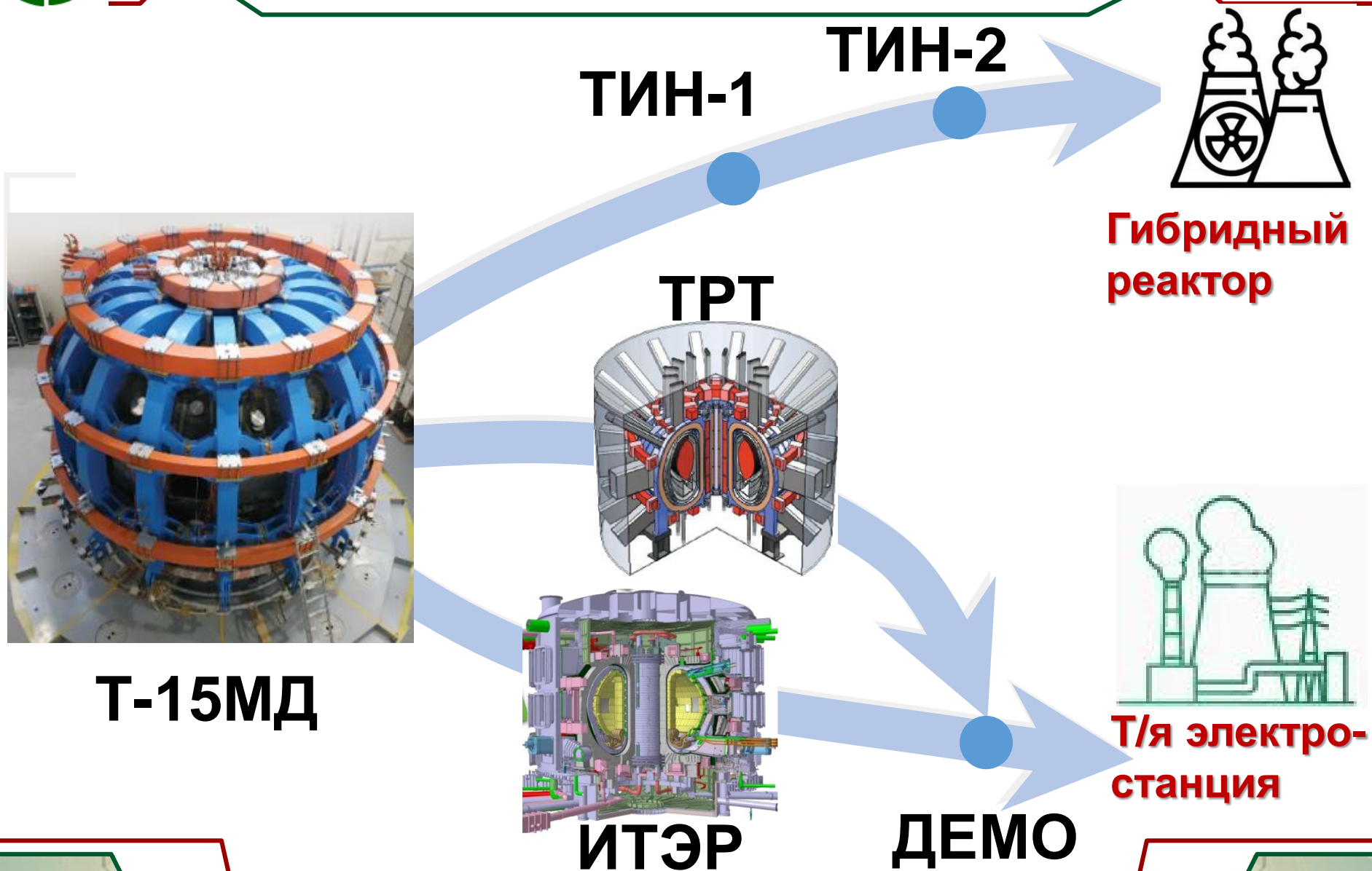


**31.03.2023** Первая плазма  
**2023** весенняя и осенняя  
эксп. кампании

**2024** осенняя  
экспериментальная  
кампания

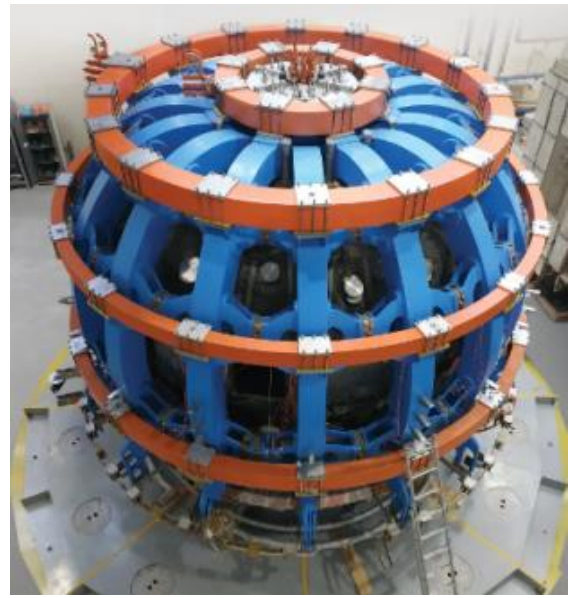


# Цели Т-15МД





# Цели Т-15МД

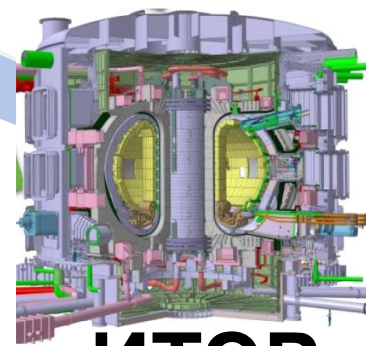
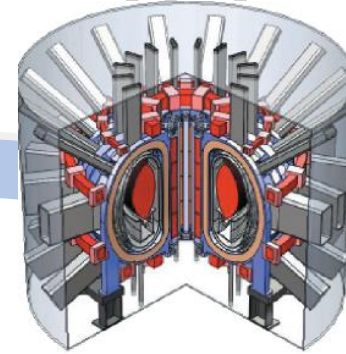


Т-15МД

ТИН-1

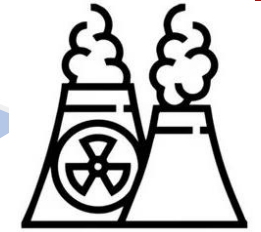
ТИН-2

ТРТ



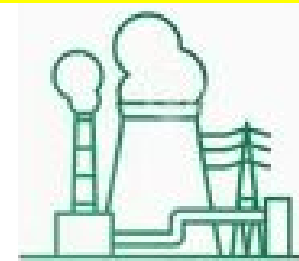
ИТЭР

ДЕМО



Целевые  
параметры:

- $T_i, T_e$
- $n_e$
- $\tau_E$
- $\beta$
- $I_{NI}$
- $t_{imp}$





# Цели Т-15МД

**Цель научных исследований на токамаке Т-15МД:**  
получение физической и технологической баз данных в обоснование создания стационарных термоядерных источников нейтронов гибридных реакторов на основе токамаков, а также обеспечение участия России в проекте ИТЭР.

**Основное направление работ:** поддержание квазистационарного устойчивого режима улучшенного удержания в плазме Т-15МД с длительностью разряда от нескольких до сотен секунд с помощью систем дополнительного нагрева плазмы.



# Программа Т-15МД

## Физические задачи

- Экспериментальные исследования (включая развитие диагностических методик)
- Расчетно-теоретические работы

## Инженерные задачи

- Системы доп. нагрева
- Системы заполнения плазмы
- Технологии первой стенки
- Обеспечение безопасной работы
- Системы дистанционного управления

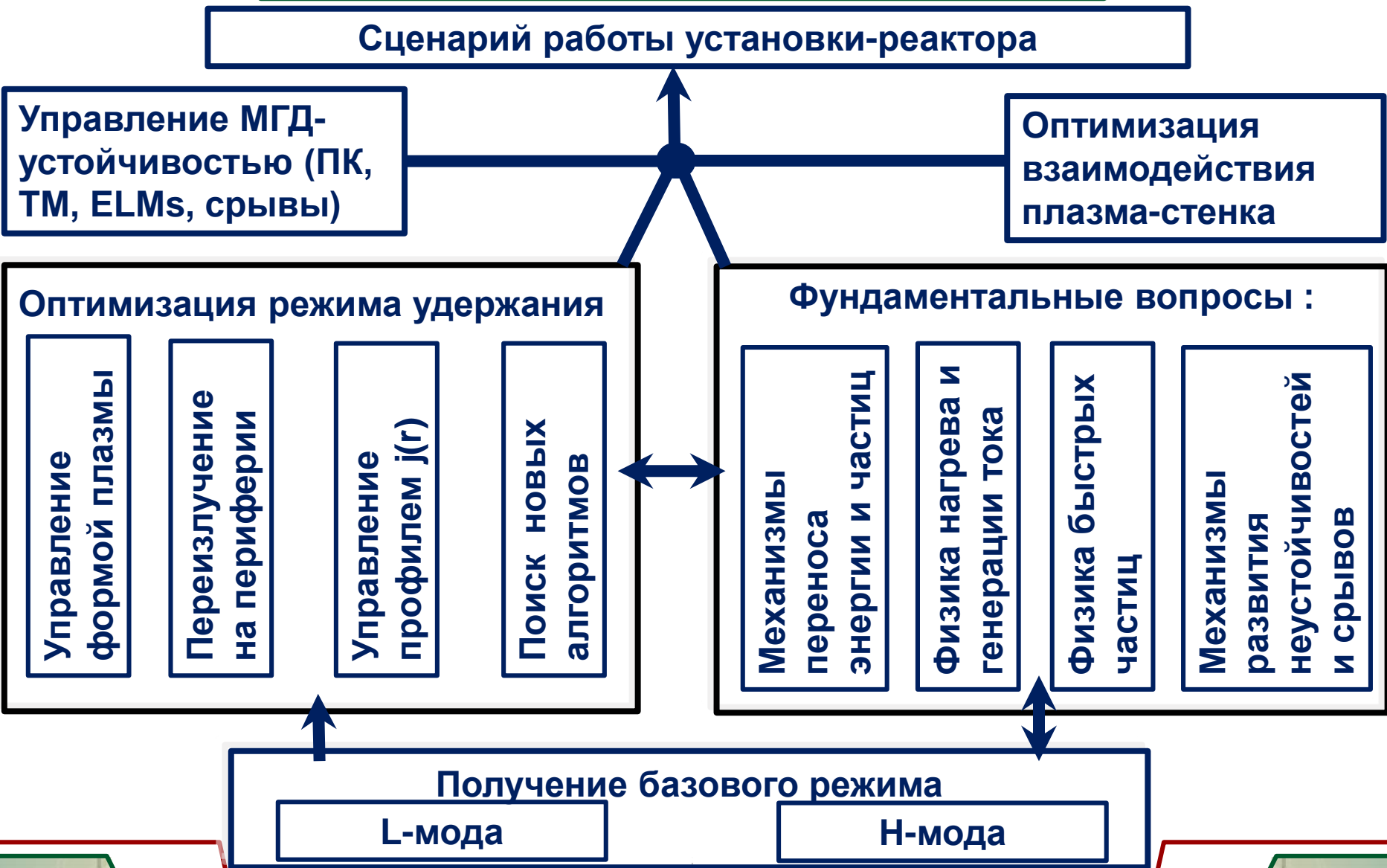
и др.

## Организационные задачи

- Создание коллектива для решения всего комплекса задач
- Сохранение научной школы по физике плазмы и УТС
- Отработка алгоритмов взаимодействия персонала



# Физические исследования





# Комплекс ЭЦР нагрева

## Особенности:

- **2 частоты**, длительность 30 с  
 $f=82.6$  ГГц 3x1 МВт (ГИКОМ)  
( $B_{res}=1,48$  Тл,  $n_{cr}=4,2 \times 10^{19}$  м<sup>-3</sup>)
- $f=105$  ГГц 2x1 МВт (ГИКОМ)  
( $B_{res}=1,88$  Тл,  $n_{cr}=6,8 \times 10^{19}$  м<sup>-3</sup>)

*В перспективе +3 гиротрона x1 МВт*

- **Вакуумированные волноводы**
- **Независимые системы ввода** для каждого гиротрона
- **Изменяемые тороидальный и полоидальный углы ввода**
- **2 тороидальных сечения**



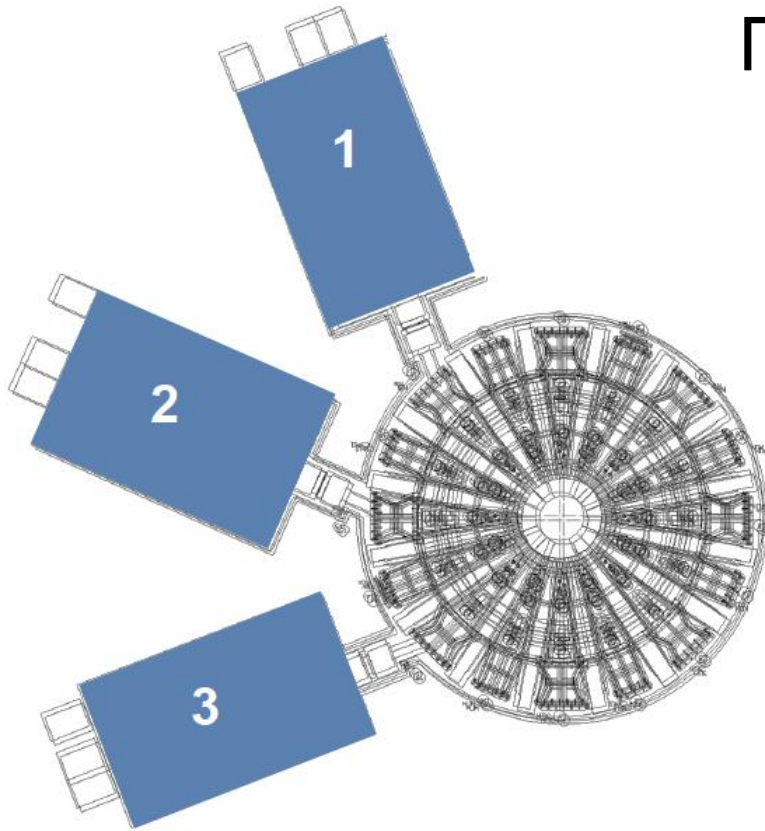
Экватор:

$$\phi_p \sim (\mp 5^\circ) \div (\pm 30^\circ)$$

$$\phi_T \sim (-28^\circ) \div (+21^\circ)$$



# Комплекс инжекционного нагрева



Параметры каждого инжектора:

• Энергия	20-60 кэВ
• Мощность	2 МВт
• Длит. импульса	Непрерывный
• Тангенциальная инжекция ( $\phi_T \sim 27^\circ$ на входе в токамак, $R_t \sim 1,3$ м)	
• Атомы	H
• 2 ионных источника	

Возможности комплекса по нагреву плазмы и генерации тока:

*[М.Ю. Исаев М-С-1-4]*



# ВЧ нагрев и генерация тока

## 2 системы в стадии разработки

- **НГГТ** (ФТИ им. А.Ф.Иоффе): *[Трошин Г.А. и др., М-С-2-27]*

$$P_{\text{LH}} = 4 \text{ МВт}$$

$$f = 2,45 \text{ ГГц}$$

Основная цель: Генерация неиндукционного тока

- **ИЦРН** (НИИЭФА им. Д.В.Ефремова):

$$P_{\text{ICRH}} = 6 \text{ МВт (3МВт+3МВт) / 30 с}$$

$$f = 15\text{-}60 \text{ МГц}$$

Цели: Нагрев плазмы в разных схемах ( $2\omega_{\text{ci}}$ , minority); генерация тока быстрыми волнами; ИЦ подготовка камеры



# Диагностический комплекс

## I. Измерение параметров плазмы

- Глобальные параметры и управление: э/м диагностики
- $T_e$ : томсоновское рассеяние, ECE, SXR спектрометр, зонды Ленгмюра
- $n_e$ : томсоновское рассеяние, СВЧ и лазерный интерферометры, рефлектометрия, ЗПТИ, зонды Ленгмюра, прыгающий зонд
- $T_i$ : CXRS, анализатор нейтральных частиц, ЛИТ
- $E_r$  : ЗПТИ
- $q(r)$ : MSE
- $n_Z, n_H, z_{\text{eff}}$ : спектроскопия
- $P_{\text{rad}}$ : болометры, AXUV
- XR: многоканальные спектрометры, мониторы
- МГД неустойчивости: магнитные зонды, XR измерения

## II. Измерение технологических характеристик

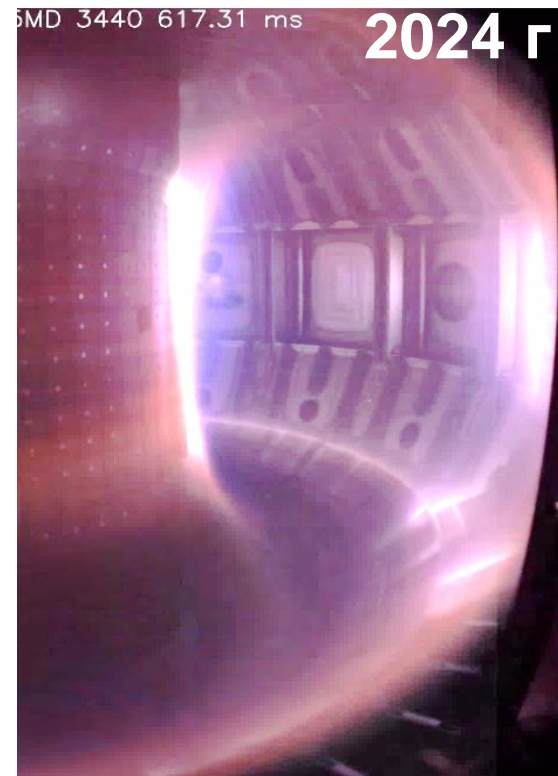
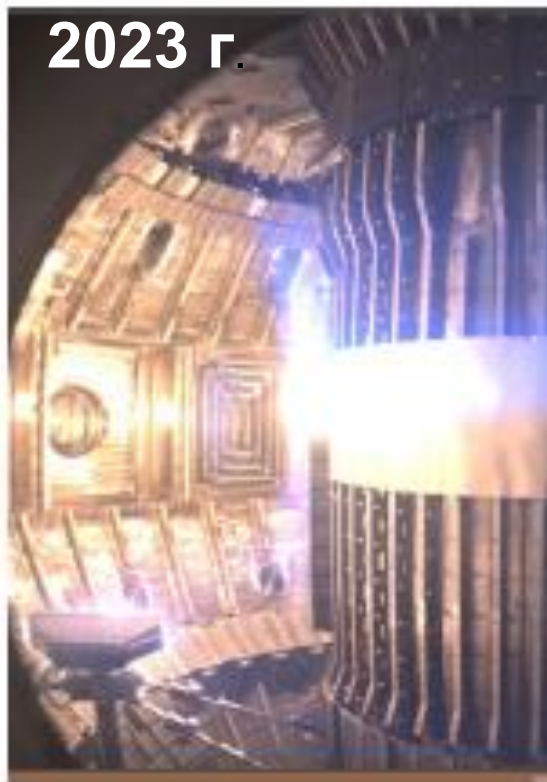


# План доклада

- Параметры и цели Т-15МД
- Научная программа и «инструменты» для ее реализации
- **Новые экспериментальные результаты**
  - **Расширение области рабочих параметров**
  - **Начало физических исследований**
  - **Развитие диагностик**
- Заключение



# Монтаж элементов первой стенки

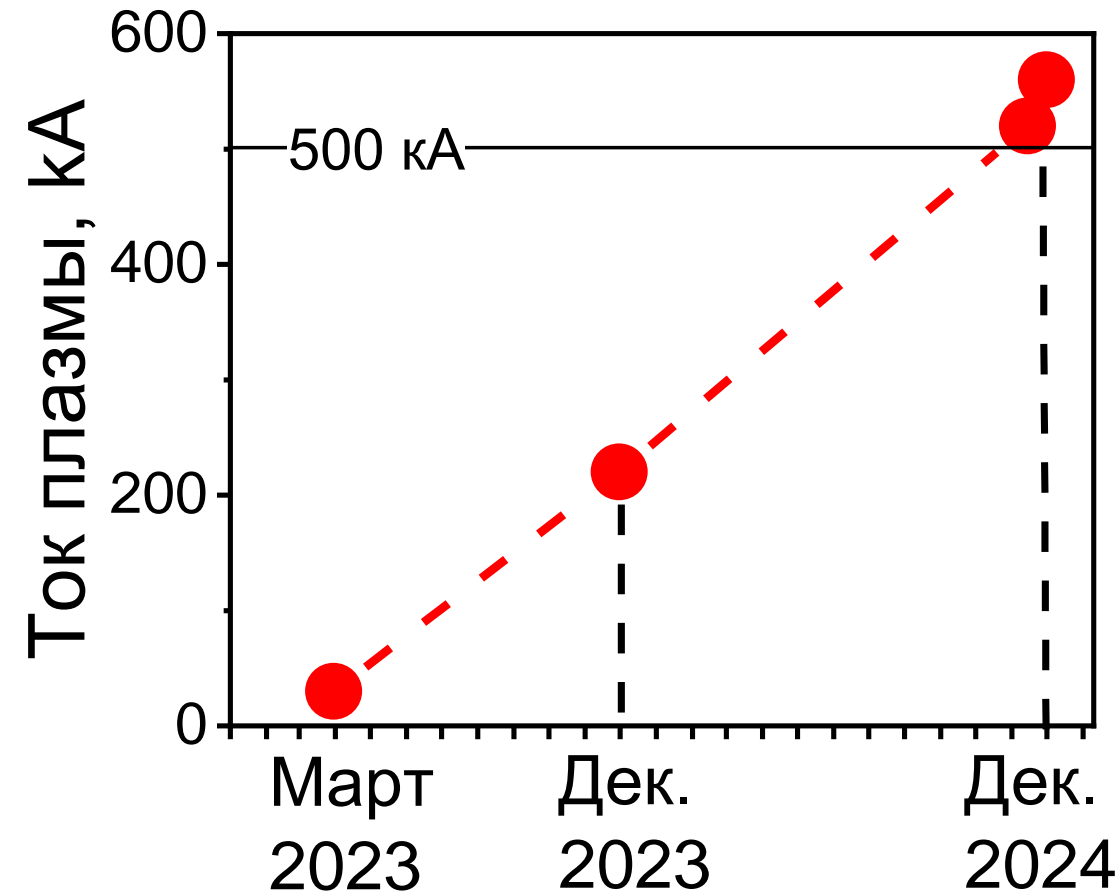


- Рельсовый графитовый лимитер
- Поверхность вакуумной камеры не закрыта графитом
- Графитовые тайлы на верхних витках пассивной стабилизации

- Рельсовый лимитер демонтирован
- Центральный столб и нижний дивертор закрыты графитовыми тайлами
- Графитовые тайлы на всех витках пассивной стабилизации



# Расширение рабочей области по $I_p$



Тороидальное поле:

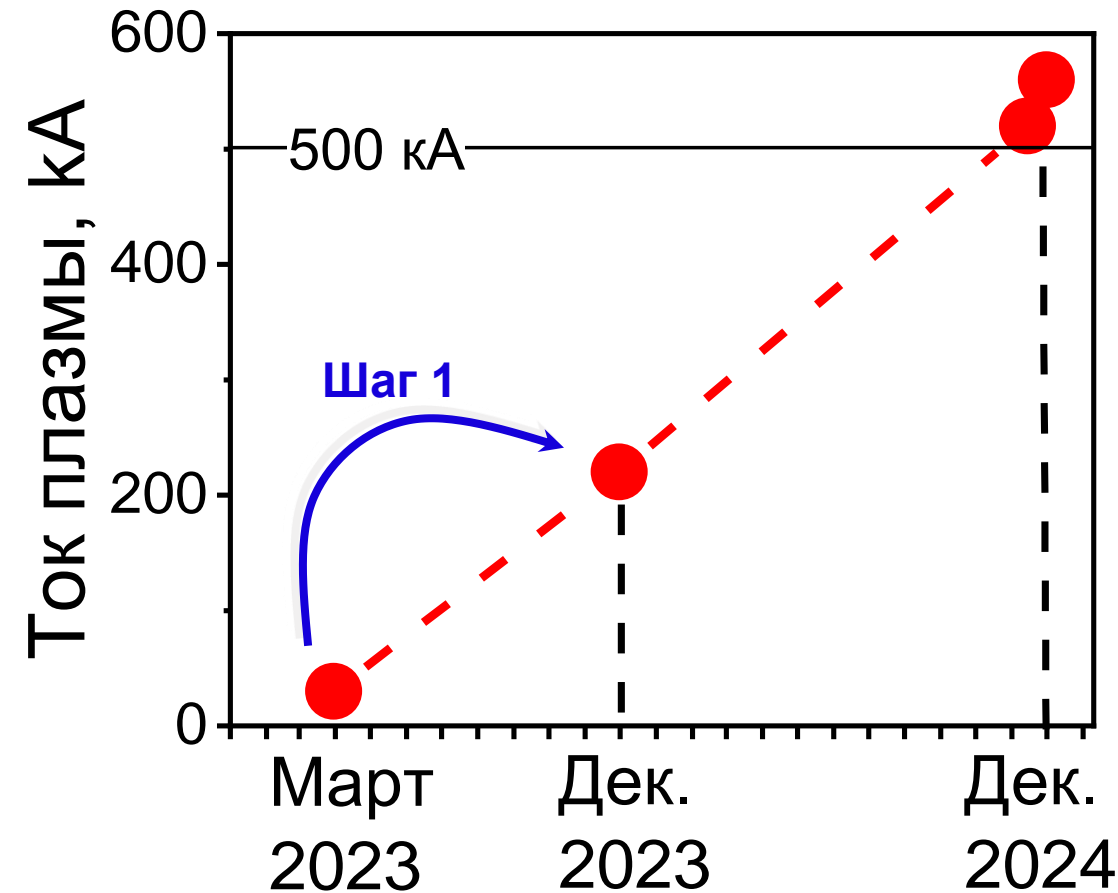
**2023 г.**  $B_T=1,1-1,2$  Тл

**2024 г.**  $B_T=1,5$  Тл

**Вышли на режимы с током плазмы,  
превышающим 0,5 МА**



# Расширение рабочей области по $I_p$



Тороидальное поле:

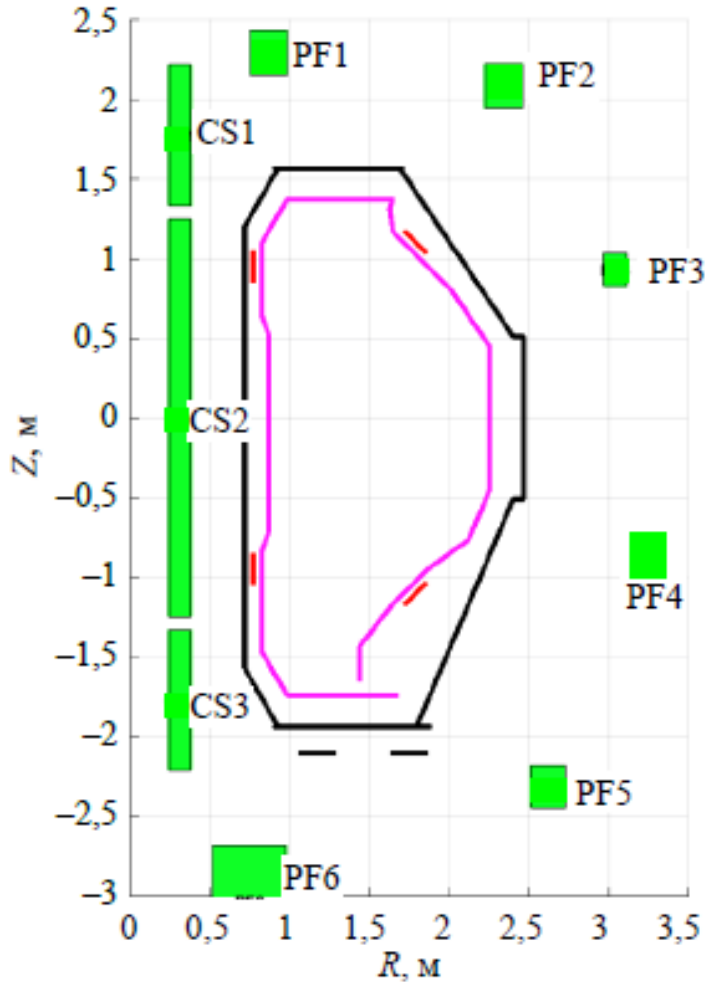
**2023 г.**  $B_T=1,1-1,2$  Тл

**2024 г.**  $B_T=1,5$  Тл

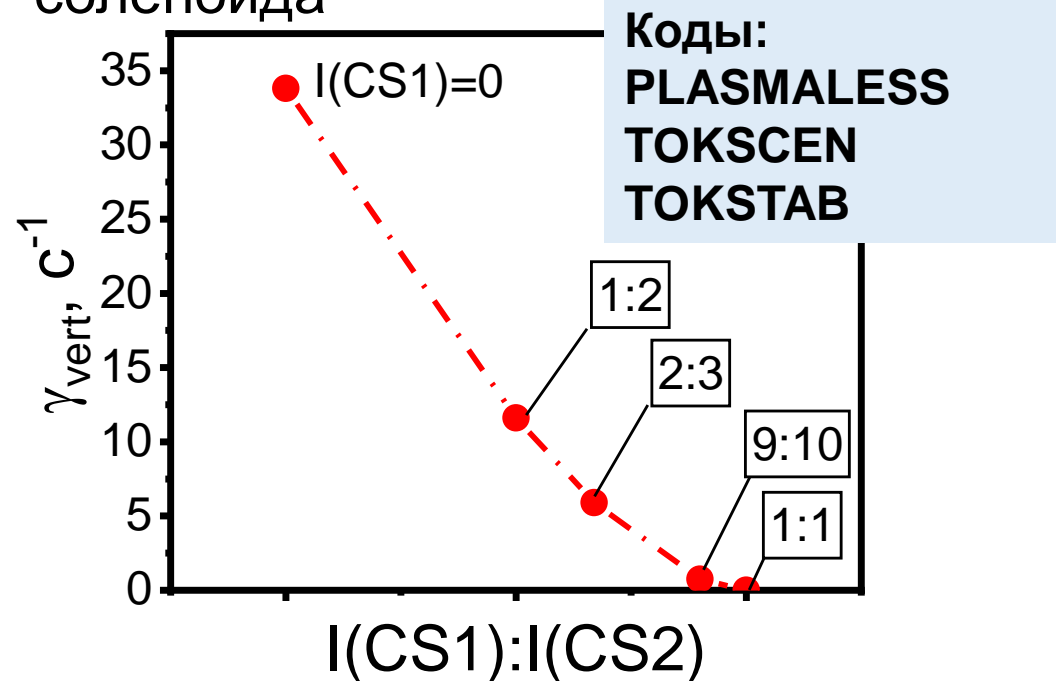
**Вышли на режимы с током плазмы,  
превышающим 0,5 МА**



# Шаг 1: Стабилизация положения шнура по вертикали



- Перераспределение токов в секциях соленооида



- Коррекция за счет соотношения токов в управляющих витках

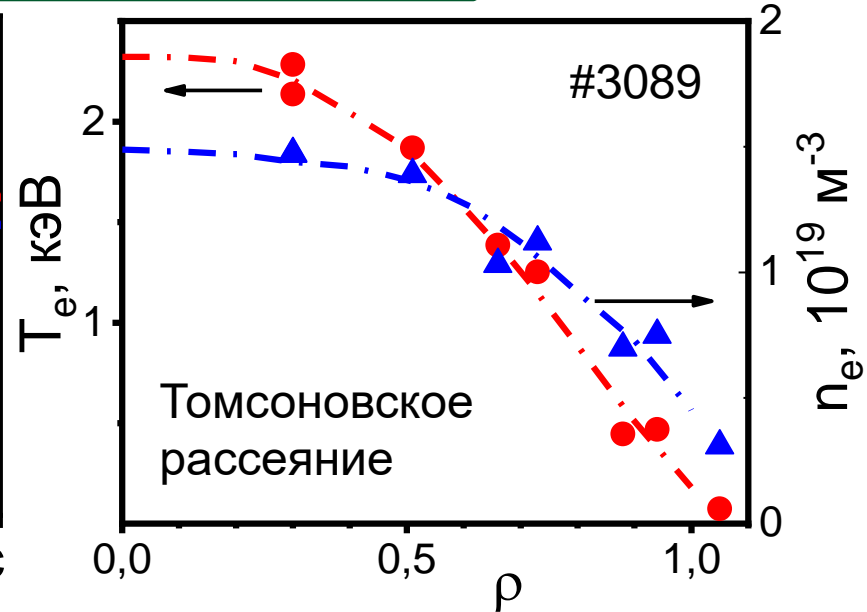
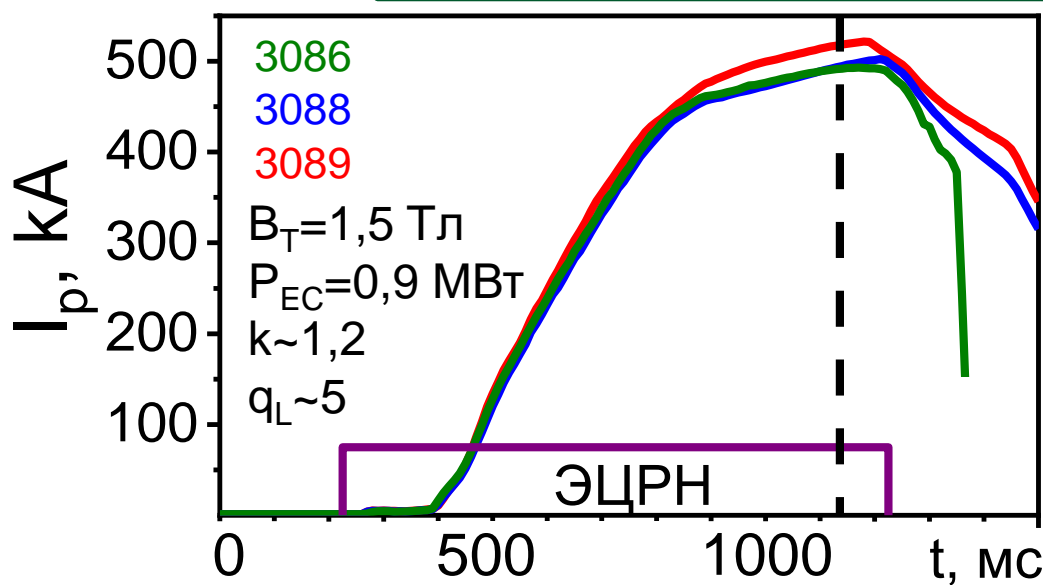
$$K = \frac{I(\text{PF2}) + I(\text{PF5})}{I(\text{PF3}) + I(\text{PF4})} > 2$$

- Комбинированный способ

[Д.Ю. Сычугов и др., ВАНТ-ТС, 2024]



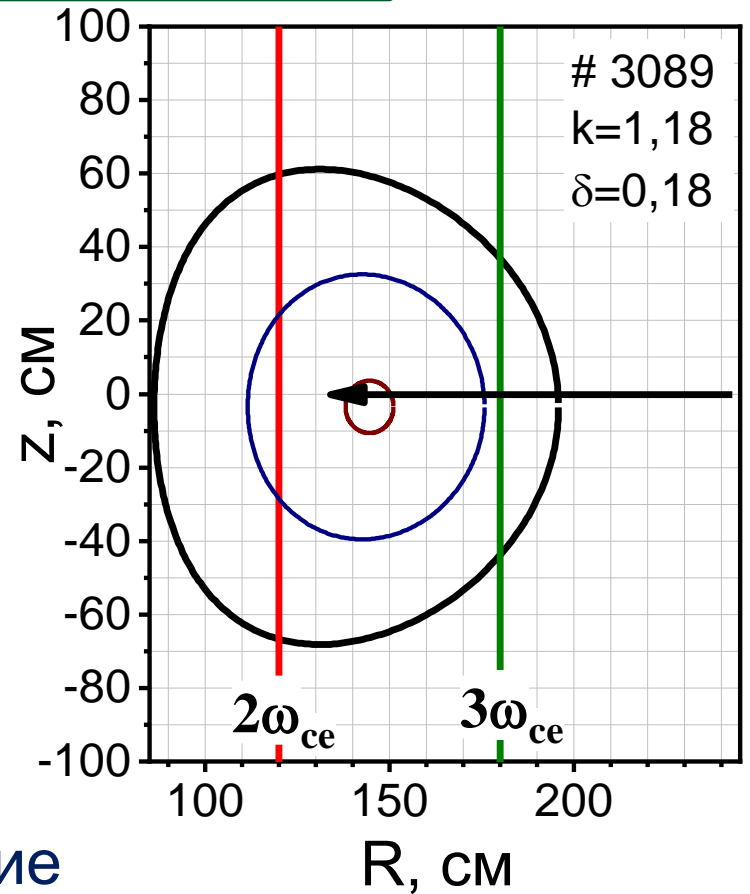
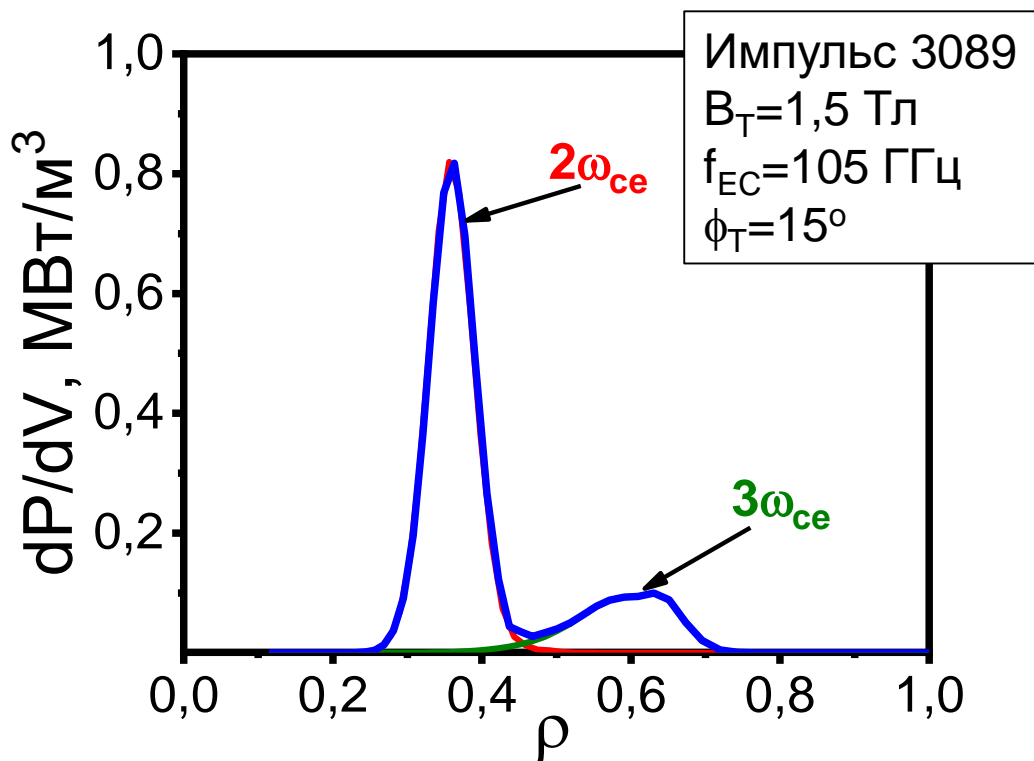
# Характеристики разрядов с $I_p > 0,5$ кА



- Разряды с током плазмы, превышающим 0,5 МА получены в режимах с ЭЦР нагревом ( $P_{EC} = 0,9$  МВт на входе в токамак) при средней плотности плазмы  $> 10^{19} \text{ м}^{-3}$
- Энергетическое время жизни в полученных разрядах соответствует скейлингу L-моды: # 3089  $(\tau_E)^{exp} \sim 24$  мс  
 $(\tau_E)^{L89-P} \sim 28$  мс



# Поглощение СВЧ-мощности



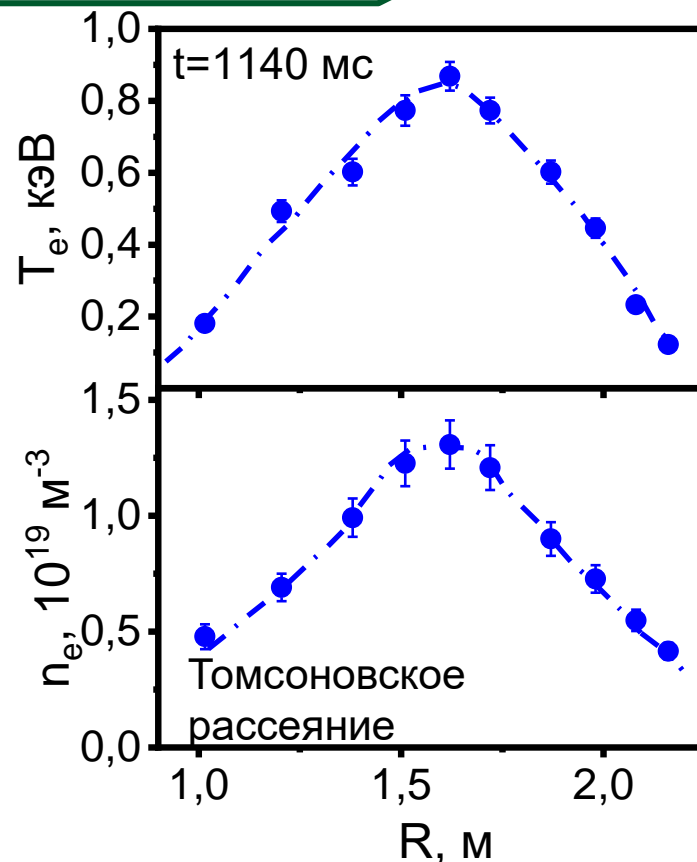
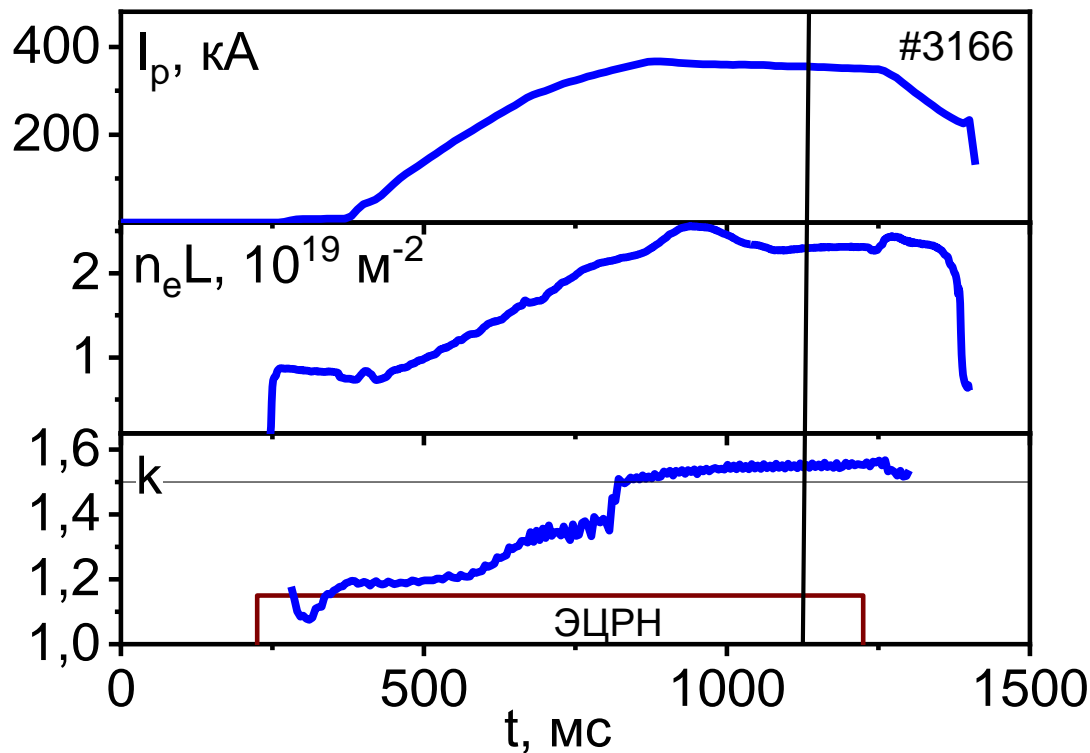
- Полное однопроходное поглощение
- Доля мощности, поглощенной в окрестности  $3\omega_{ce}$  резонанса  $\sim 30\%$

[Кирнева Н.А. и др., М-С-2-1]



# Режимы с $k > 1,5$

$B_T = 1,5$  Тл     $P_{EC} = 0,9$  МВт



**2023 г.**  $k < 1,2$

**2024 г.**  $k > 1,5$

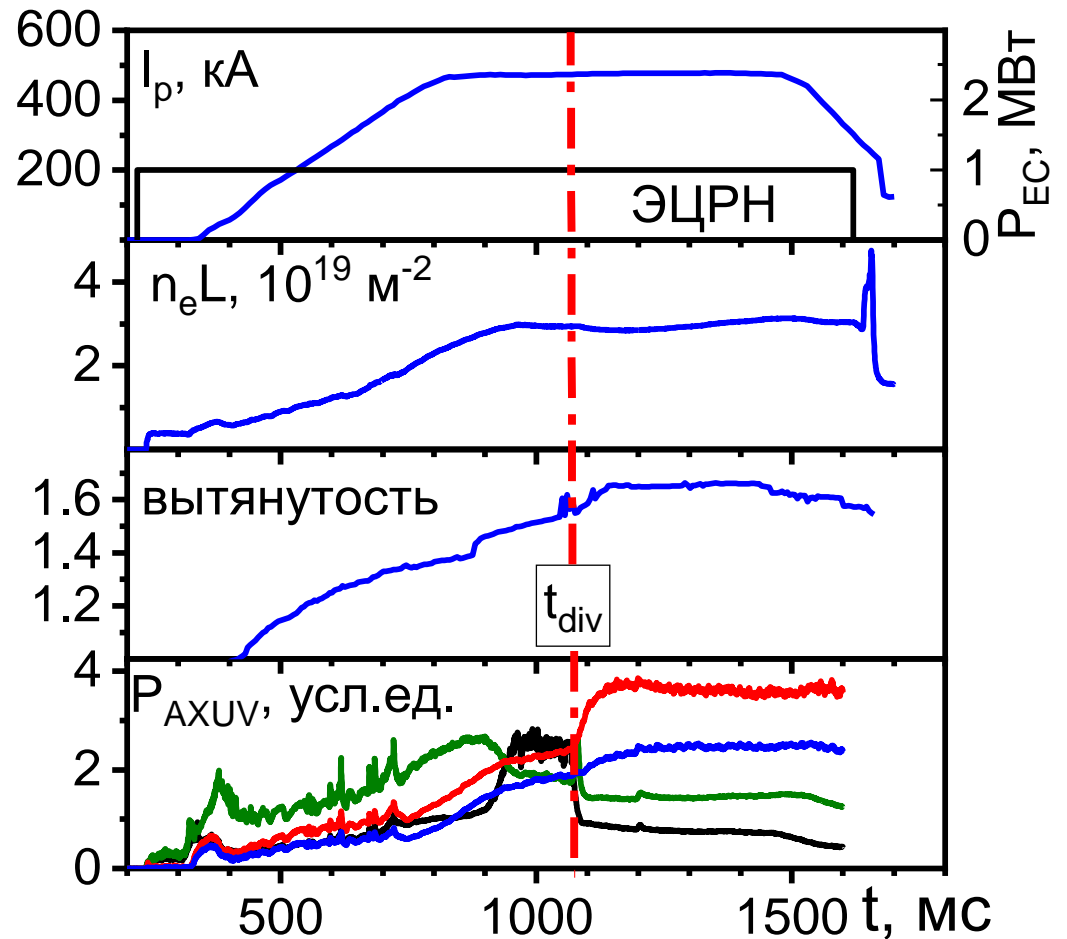
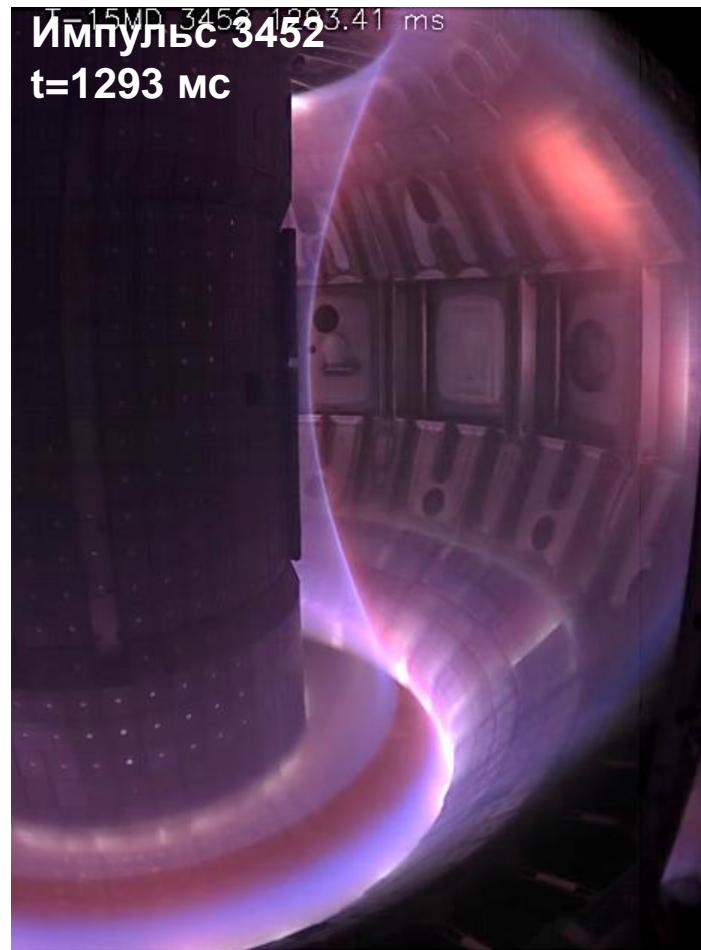
Режим соответствует L-моду удержания:

$$(\tau_E)^{\text{exp}} \sim 15 \text{ мс}$$

$$(\tau_E)^{\text{L89-P}} \sim 27 \text{ мс}$$



# Первые разряды с диверторной конфигурацией

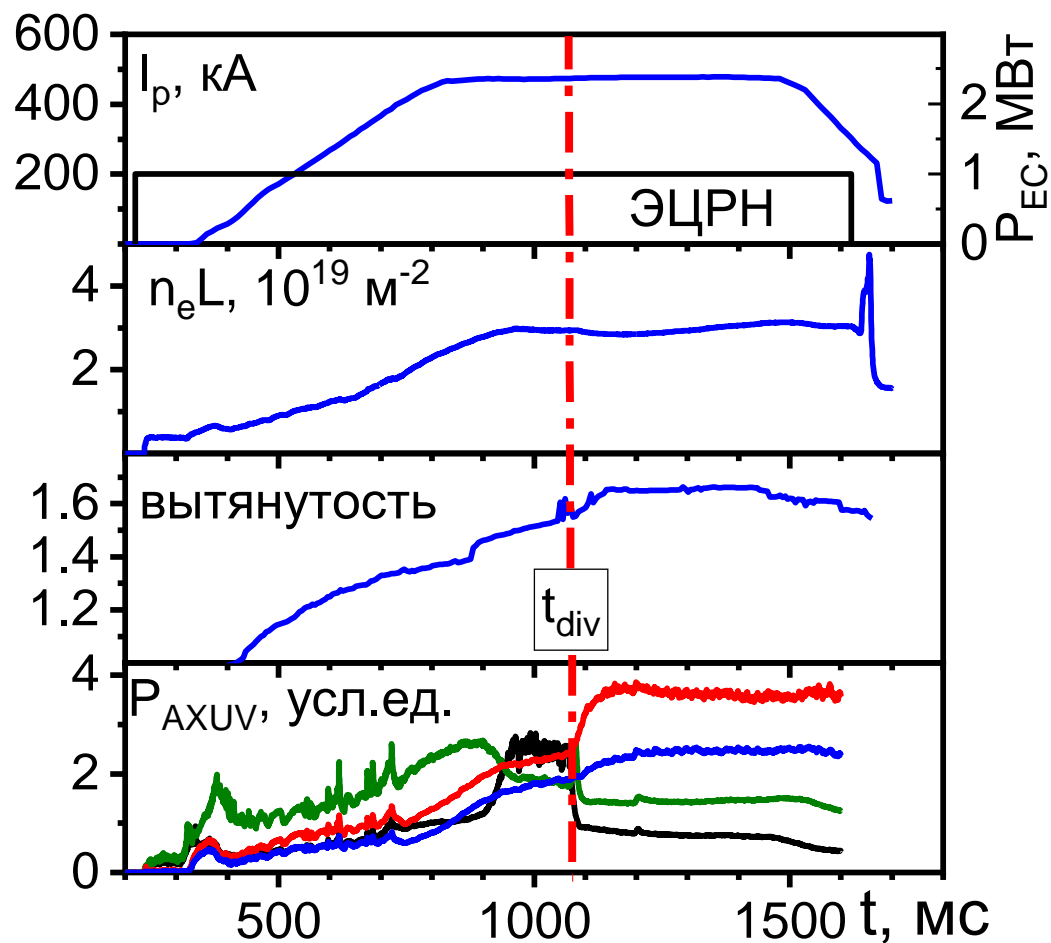
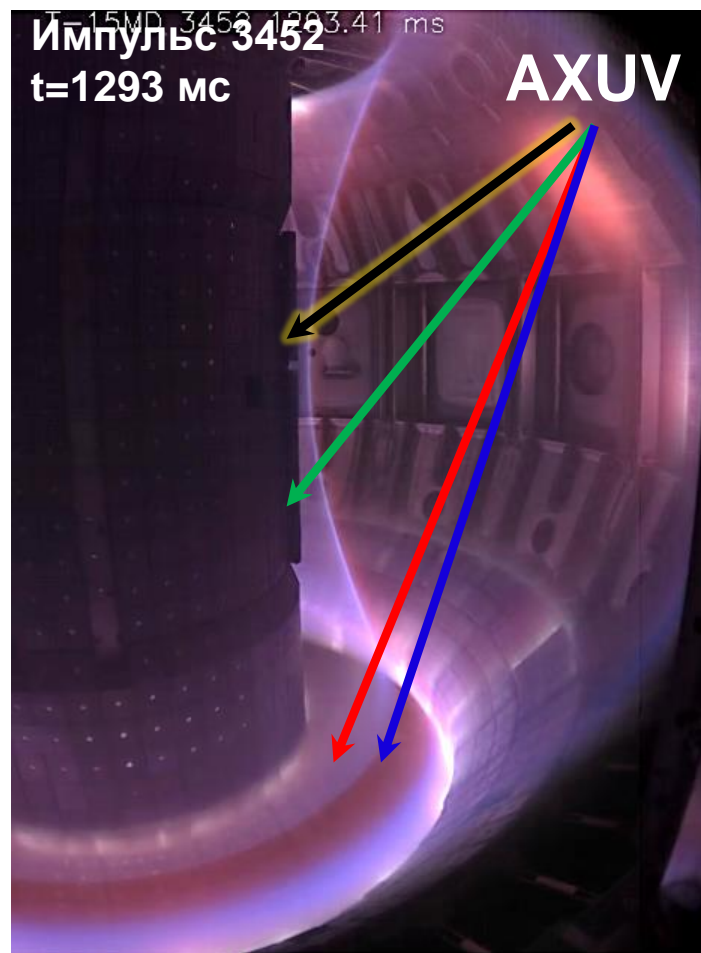


Переход в диверторную конфигурацию регистрируется по видеокамере, AXUV, болометрам и зондам Ленгмюра

[Сарычев Д.В. М-С-3-26; Rogozin К.А. М-С-3-27]



# Первые разряды с диверторной конфигурацией

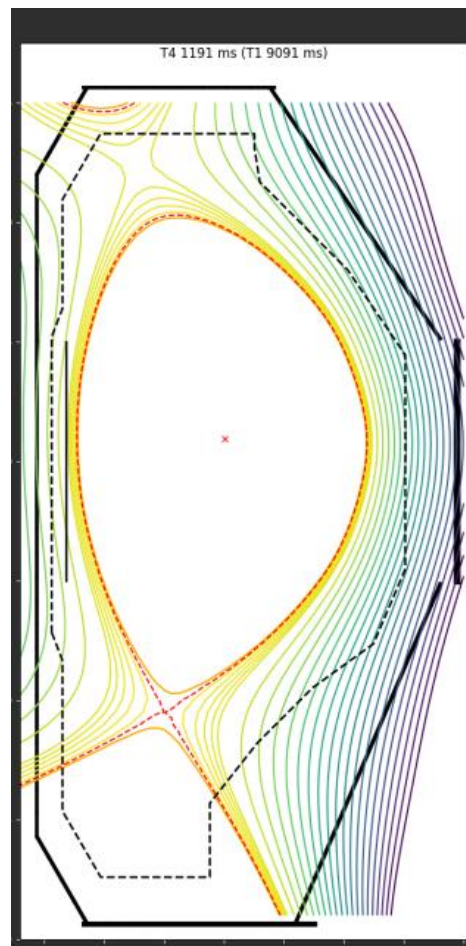
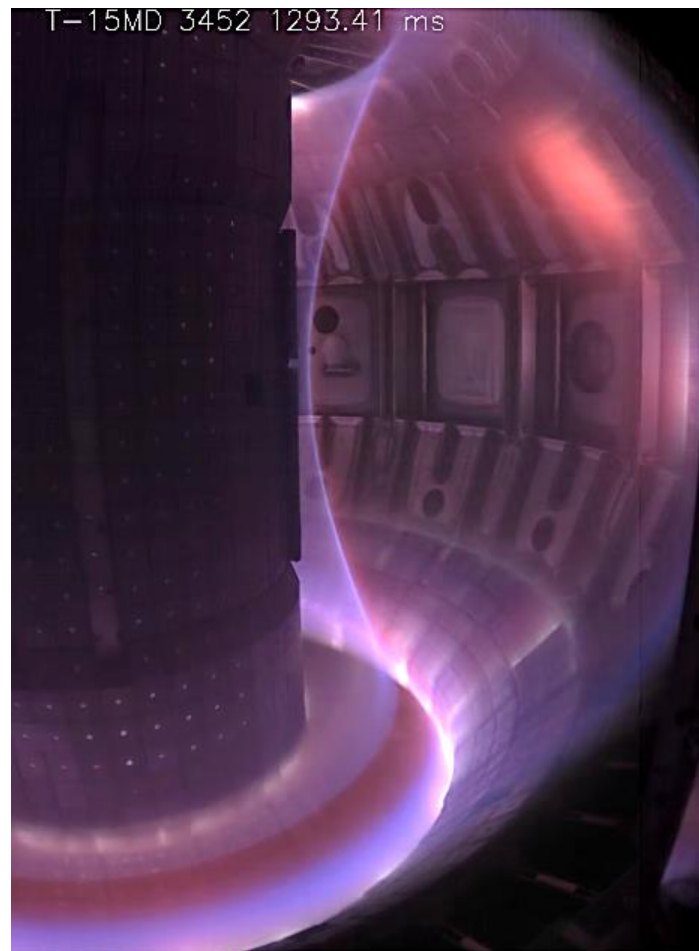


Переход в диверторную конфигурацию регистрируется по видеокамере, AXUV, болометрам и зондам Ленгмюра

[Сарычев Д.В. М-С-3-26; Rogozin К.А. М-С-3-27]



# Первые разряды с диверторной конфигурацией



Код dBound

*[Уласевич Д.Л. М-С-3-9]*

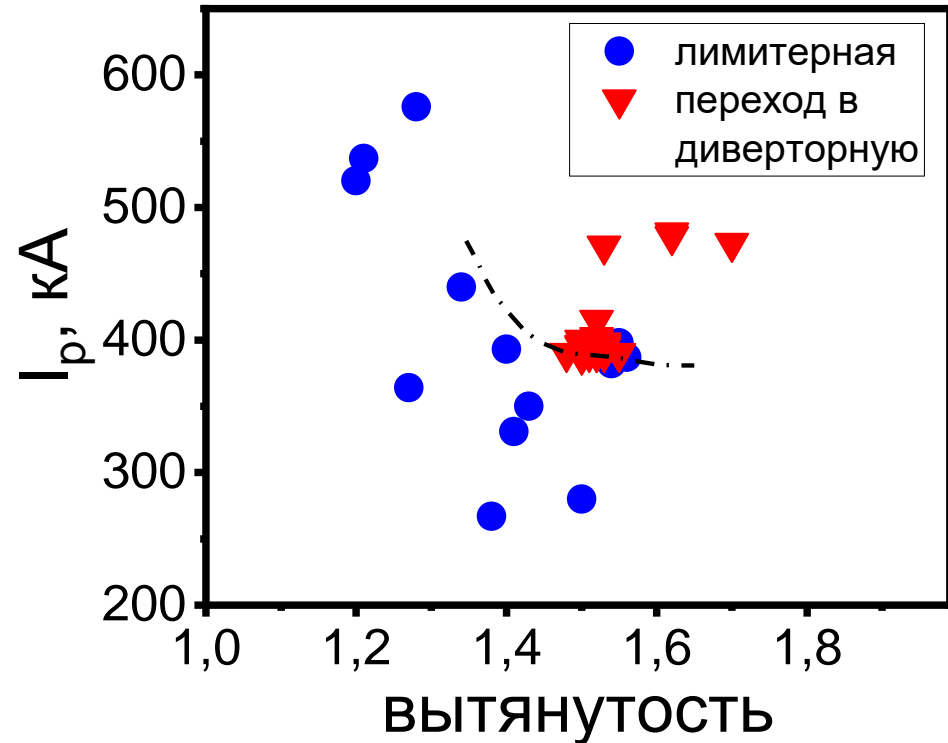
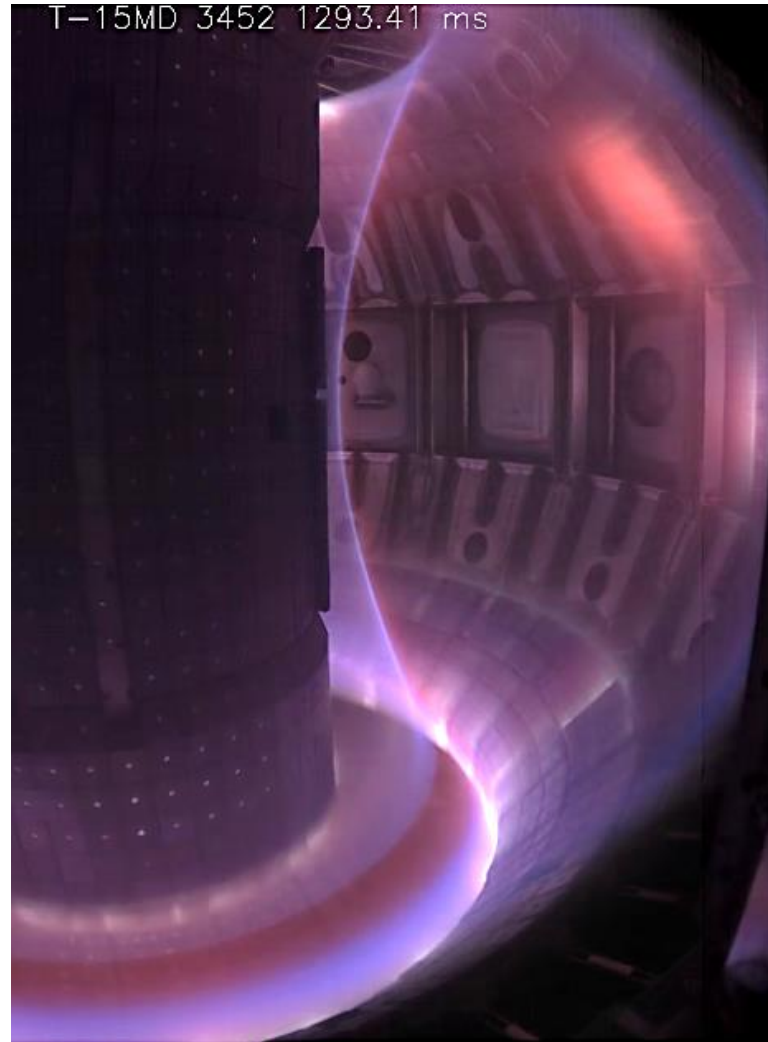
Переход в диверторную конфигурацию подтверждается с помощью кодов восстановления равновесия

*[Уласевич Д.Л. М-С-3-9, Храпов А.А. М-С-1-1]*



# Диверторная конфигурация: область параметров

T-15MD 3452 1293.41 ms



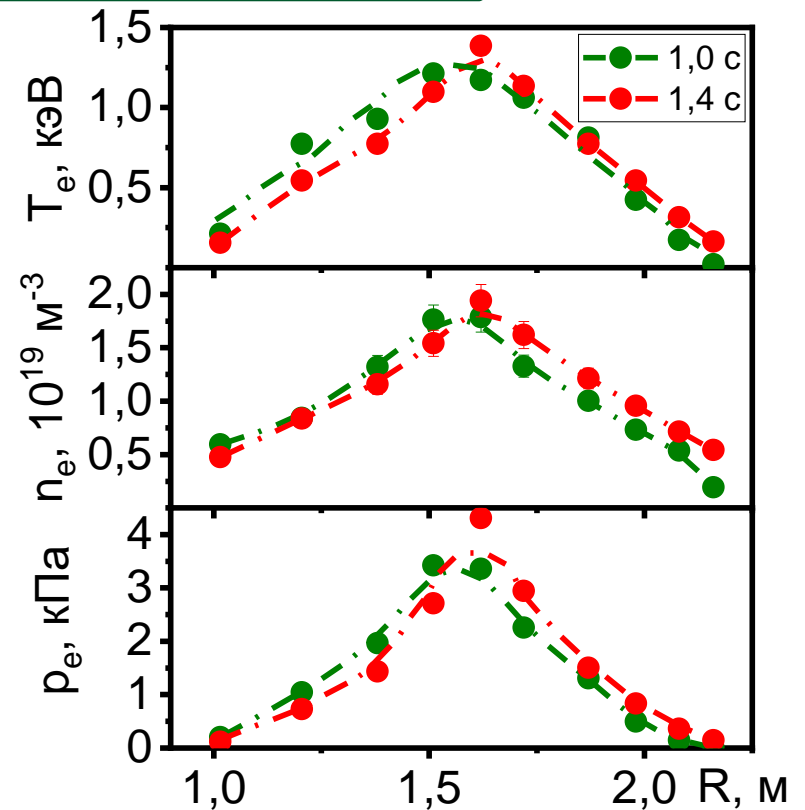
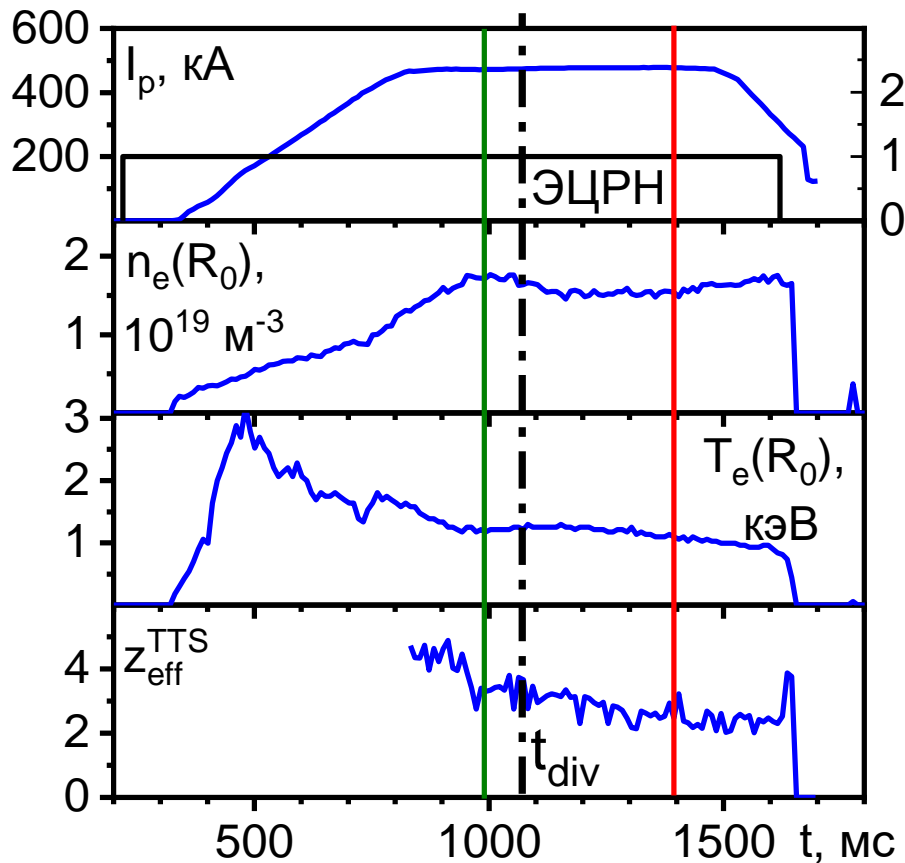
В проведенных экспериментах формирование диверторной конфигурации наблюдалось при

$$I_p > 380 \text{ кА}$$

$$k > 1,5$$



# Эволюция температуры, плотности

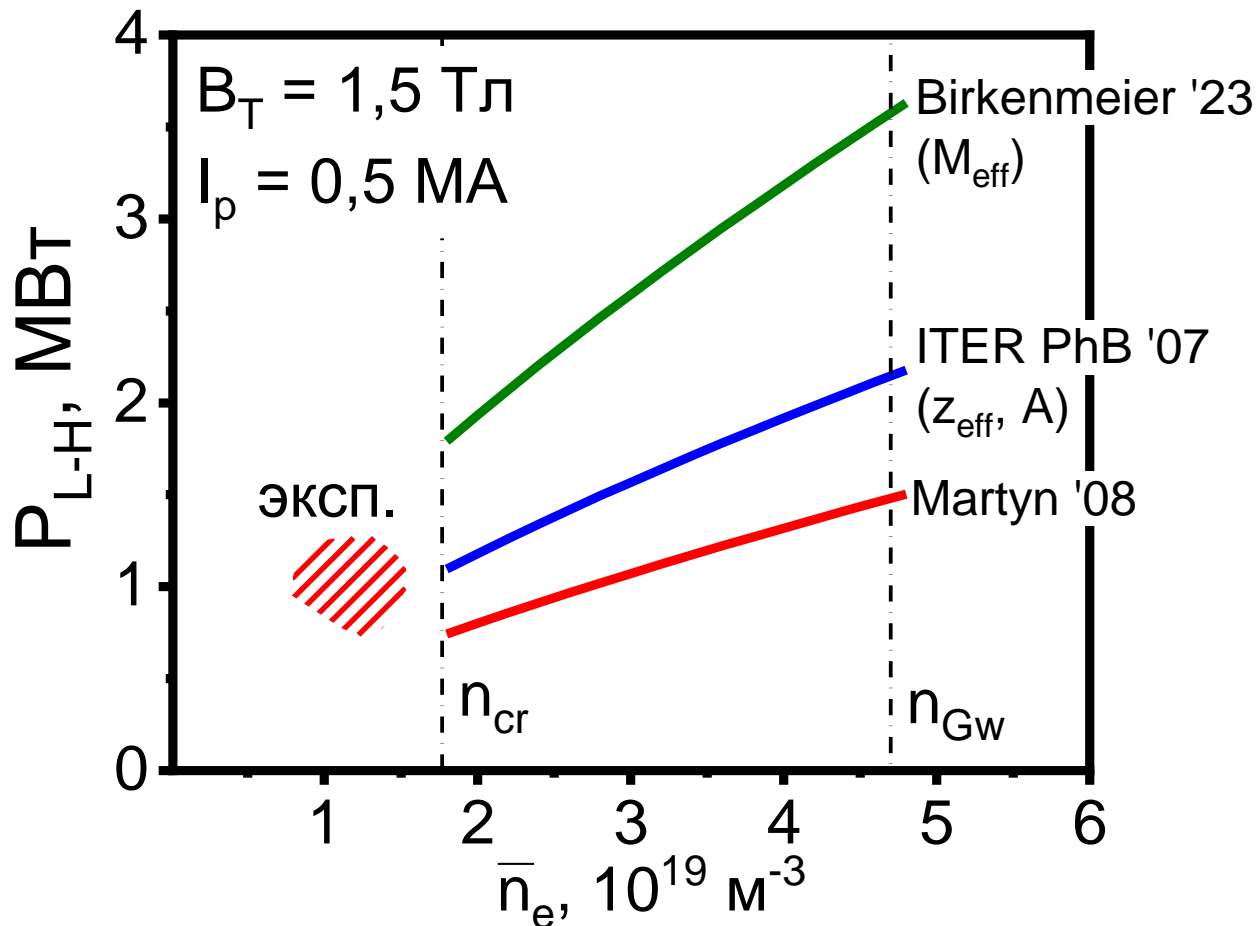


$t, c$	$\tau_E, MC$	$(\tau_E)^{L89-P}, MC$
1,0	24	33
1,4	29	37

После формирования диверторной конфигурации плазма остается в L-моде



# Перспективы L-N перехода

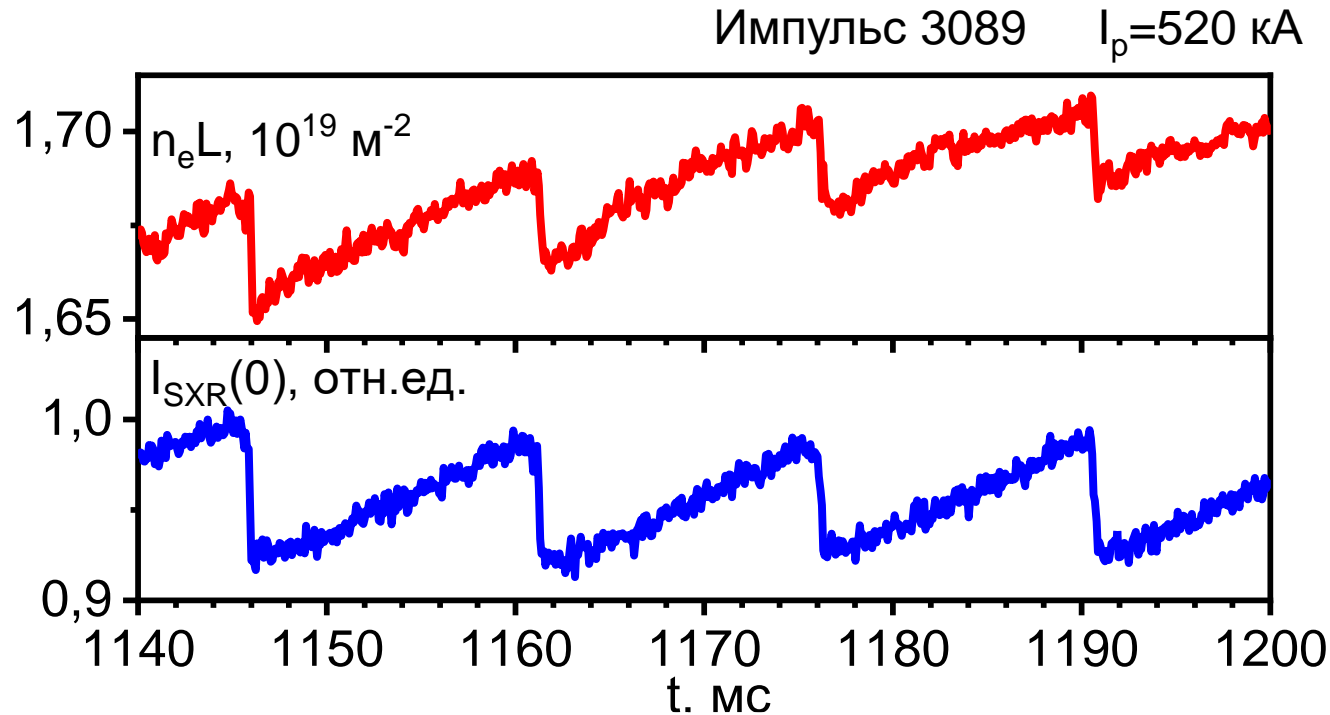


Для перехода в H-моду необходимо дальнейшее увеличение  $n_e$  и  $P_{\text{heat}}$



# Анализ переноса частиц

Регистрация пилообразных колебаний плотности на сигналах СВЧ интерферометра позволила провести анализ переноса частиц.



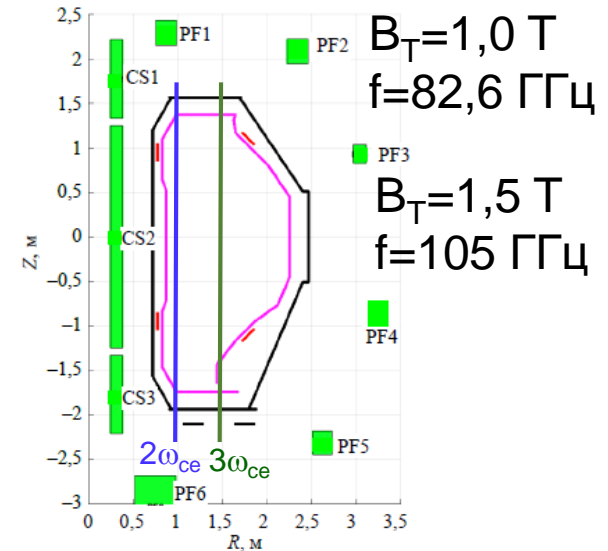
Показано, что эволюция плотности в процессе между внутренними срывами в области  $\rho < \rho_s$  удовлетворительно описывается в предположении неклассической скорости пинчевания частиц,  $V_p \text{ нео}$

*[Дрозд А.С. и др. М-С-3-24; Неудачин С.В. И др. М-С-3-25]*



# Особенности старта разряда

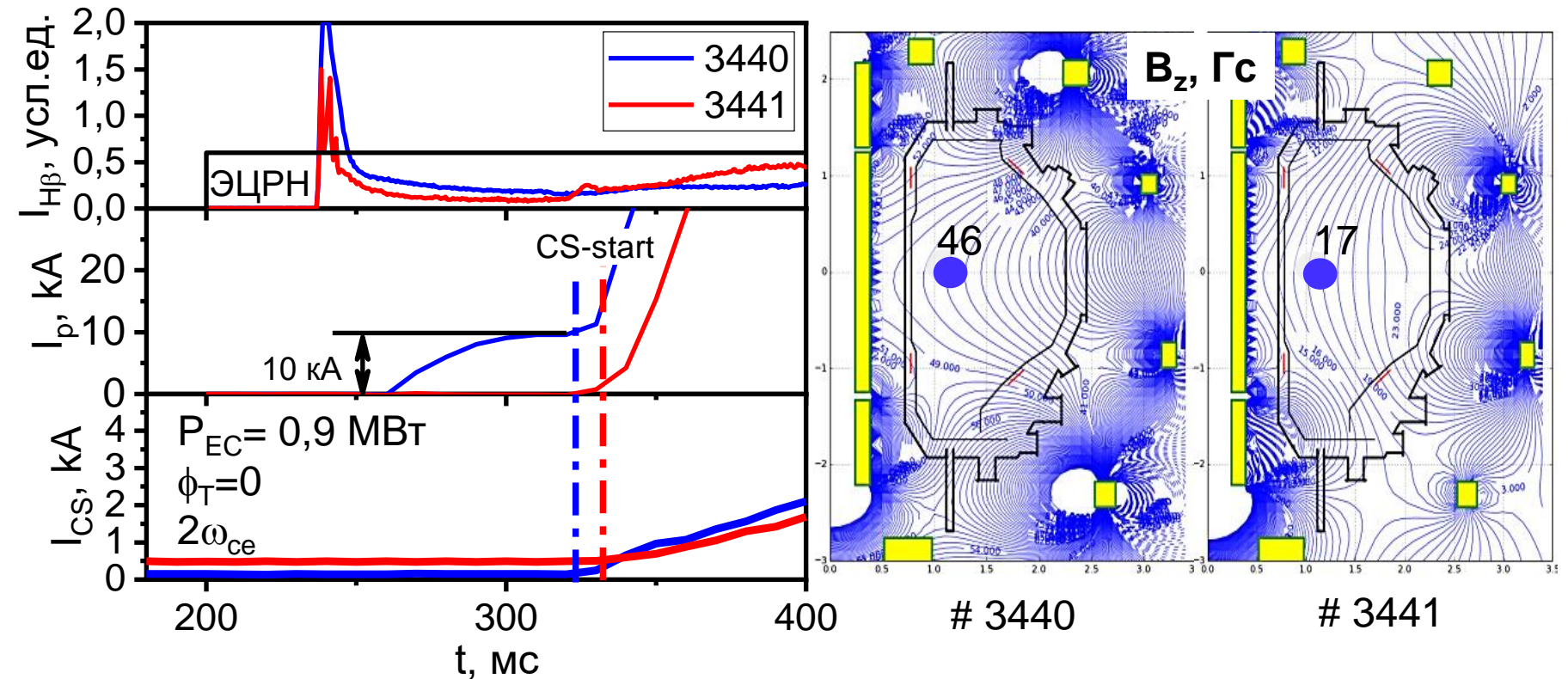
- Используется СВЧ-предыонизация  
 $P_{EC}=1 \text{ МВт} \Rightarrow 0,9 \text{ МВт}$  на входе в токамак  
Необыкновенная волна  
 $f=82,6 \text{ ГГц}$  или  $105 \text{ ГГц}$
- Начальное давление газа  $p_{нач}=10^{-5} \dots 5 \times 10^{-4} \text{ Торр}$
- В диапазоне магнитных полей  $B_T=0,9-1,4 \text{ Тл}$  для  $f=82,6 \text{ ГГц}$   
 $B_T=1-1,8 \text{ Тл}$  для  $f=105 \text{ ГГц}$   
внутри вакуумной камеры одновременно существуют две зоны ЭЦ  
резонанса – на частотах  $2\omega_{ce}$  и  $3\omega_{ce}$



**В условиях проведенных экспериментов СВЧ-пробой наблюдался только на второй гармонике ЭЦ-частоты (не наблюдался на третьей)**



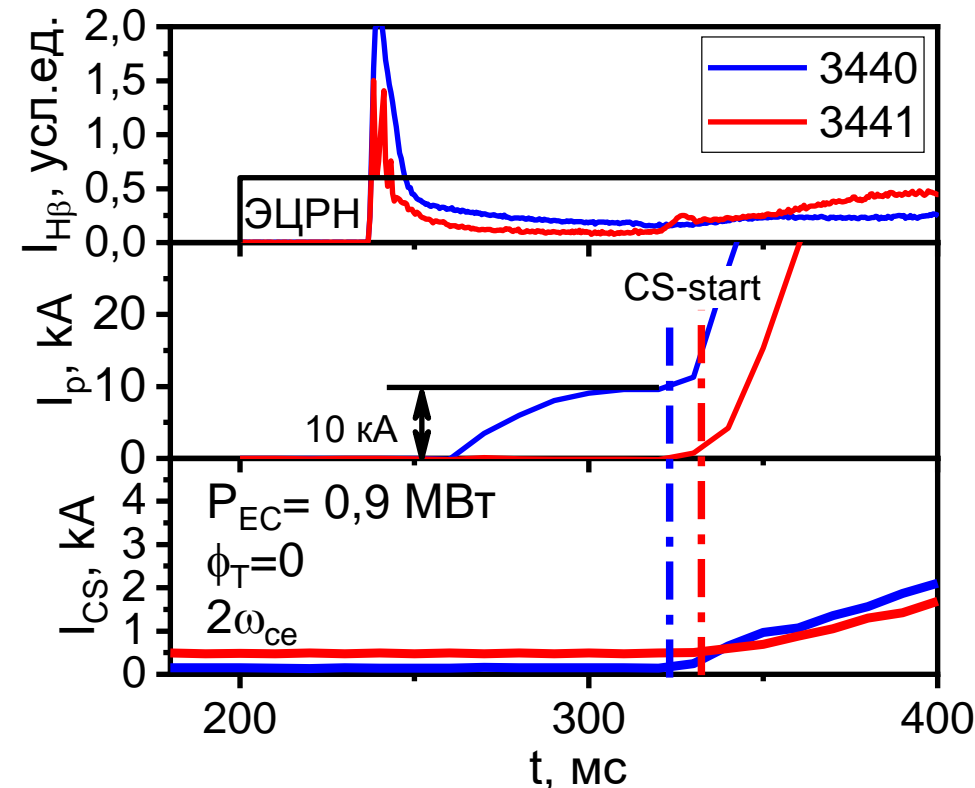
# Влияние $B_z$



- В проведенных экспериментах величина начального (затравочного) тока зависела от величины  $B_z$  и начальной магнитной конфигурации
- Появление этого тока, по-видимому, не зависит от величины  $\phi_T$  (наблюдается и при  $\phi_T = 0^\circ$ , и при  $\phi_T = 18^\circ$ )
- Для установок следующего поколения начальный ток может быть важен для оптимизации начальной стадии развития разряда



# Влияние $B_z$



	3440	3441
$dI/dt$ , MA/c	1,15	0,95
$(U_I)^{max}$ , В	2,2	2,5
$E_{  }$ , В/м	0,23	0,27

Требование ИТЭР:  $E_{||} < 0,3$  В/м

- В проведенных экспериментах величина начального (затравочного) тока зависела от величины  $B_z$  и начальной магнитной конфигурации
- Появление этого тока, по-видимому, не зависит от величины  $\phi_T$  (наблюдается и при  $\phi_T = 0^\circ$ , и при  $\phi_T = 18^\circ$ )
- Для установок следующего поколения начальный ток может быть важен для оптимизации начальной стадии развития разряда



# Расширение возможностей диагностик

1. Увеличение количества ракурсов наблюдения многоканальных диагностик:

- SXR: 1 ракурс в 2023 г. -> 3 ракурса в 2024 г.

*[Сушков А.В. и др. М-С-2-23 ]*

- Prad: *[Сарычев Д.В. и др. М-С-3-26]*

	2023 г.	2024 г.
Детекторы	AXUV; Pyro	AXUV; Pyro; SPD
Количество ракурсов	2	3

2. Ввод новых диагностик:

- Зонды Ленгмюра на внутреннем обводе и в области дивертора *[Рогозин К.А. и др. М-С-3-27]*

3. Новые возможности существующих диагностик



# Наблюдение пучков убегающих электронов

Для контроля развития пучков ускоренных электронов используются:

- Монитор жёсткого рентгеновского излучения (сцинтиллятор NaI(Tl) d25\*25 мм,  $E < 10$  МэВ,  $t \sim 10$  мкс)
- Мониторы нейтронного излучения с полиэтиленовым замедлителем и свинцовым экраном (коронный счетчик СММ-11,  $E < 2,5$  МэВ,  $t \sim 10$  мкс)
- Спектрометры жесткого рентгеновского излучения (сцинтиллятор LaBr<sub>3</sub>(Ce), d38\*38 мм,  $E < 5$  МэВ,  $t \sim 2$  мкс) с подвижным коллиматором

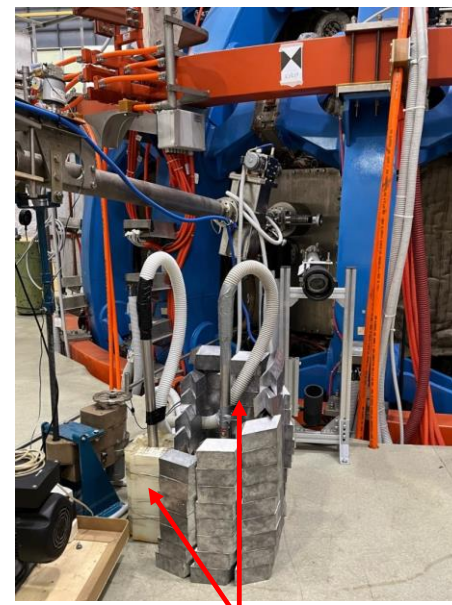
*[Тепикин В.И. М-С-1-12]*



Монитор НХР



Спектрометр НХР в коллиматоре

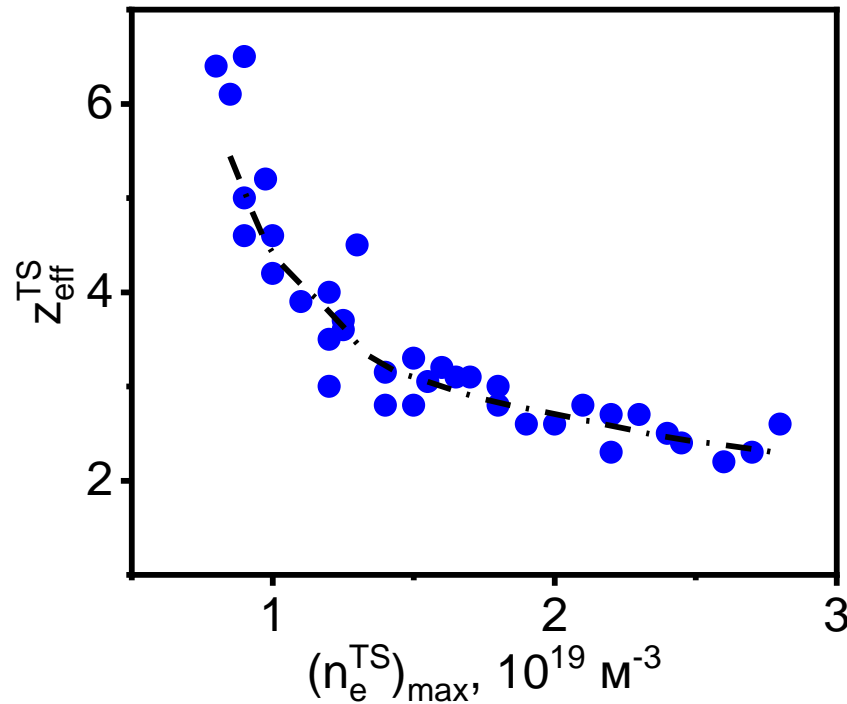


Мониторы нейтронов



# Развитие диагностики томсоновского рассеяния

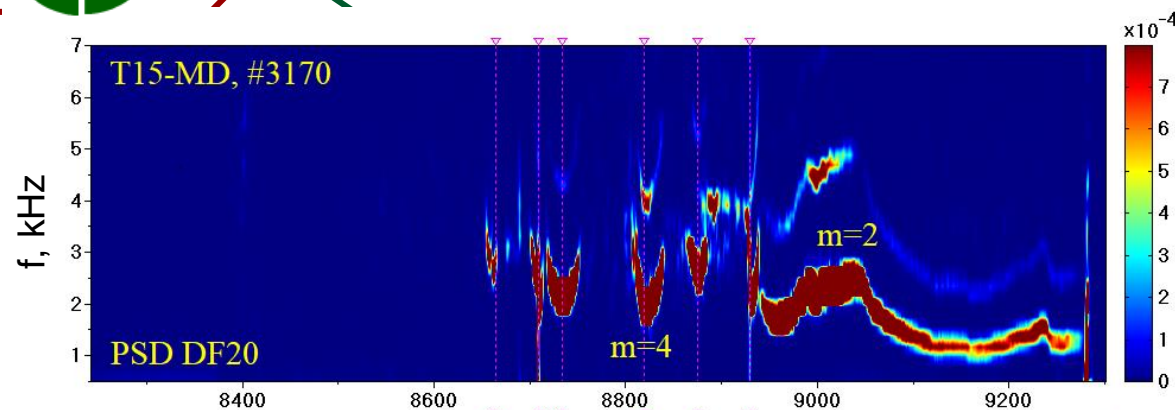
Определение эффективного заряда плазмы из измерения фонового излучения плазмы [Асадулин Г.М. и др. М-С-3-23]



Наблюдаемая закономерность в изменении  $Z_{\text{eff}}$  с плотностью не противоречит результатам, демонстрируемым на других установках

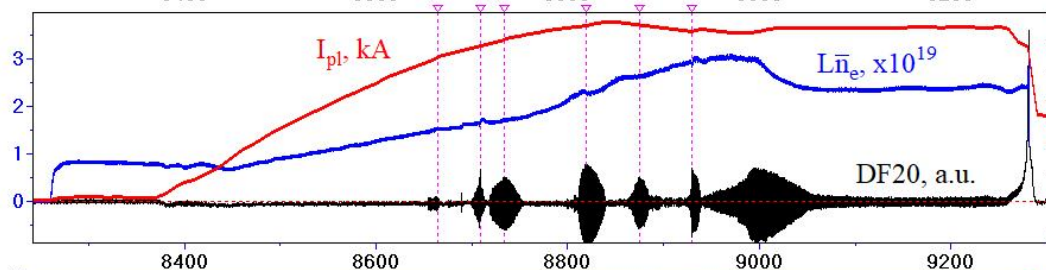


# МГД диагностика & СВЧ интерферометр

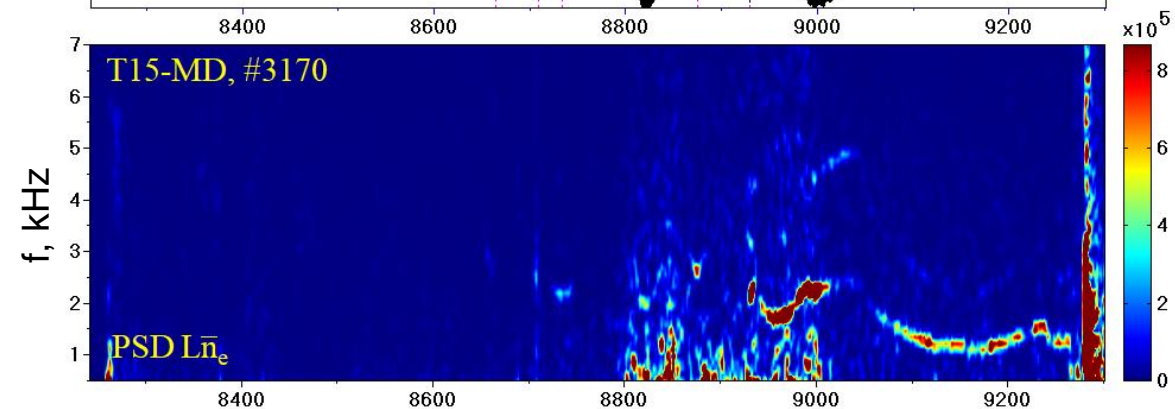


импульс №3170

Спектральная плотность мощности сигнала НЧ-магнитного зонда



Временной ход тока плазмы, хордовой электронной плотности и сигнала м/зонда



Спектральная плотность мощности хордовой электронной плотности плазмы

[Балашов А.Ю. и др.  
М-С-3-22]

Наблюдается хорошая корреляция PSD м/зонда и хордовой электронной плотности при развитии неустойчивости с  $m=2$



# Заключение

- Токамак Т-15МД выходит на рабочие параметры:
  - в режимах с  $B_T=1,5$  Тл получены устойчивые разряды с током плазмы, превышающим 0,5 МА
  - получены устойчивые разряды с вытянутостью  $k>1.5$
  - получены первые разряды с диверторной конфигурацией

Полученные режимы соответствуют L-моду удержания.

- Эксперименты ведутся с ЭЦР-предыонизацией и последующим СВЧ-нагревом. Получены разряды с  $E_{||}<0,3$  В/м в течение всего импульса. Во всех случаях СВЧ-пробой происходил в области резонанса на второй гармонике ЭЦЧ.
- Продолжается развитие диагностического комплекса.



# Заключение

- Ближайшие планы (до 2027 г.):
  - Отработка сценариев разряда с диверторной конфигурацией
  - Увеличение мощности электронно-циклотронного нагрева (до 5 МВт)
  - Вывод на рабочий режим первого инжектора (2 МВт)
  - Расширение круга физических исследований



# T-15МД на конференции

**M-Y-2-4** И.А.Земцов и др. Анализ возможности создания на токамаке T-15МД диагностики MSE-LS

**M-Y-3-3** К.О.Недбайлов, П.Р.Науменко. Численное исследование эффективности связи антеннаплазма для волн в диапазоне ионно-циклотронных частот

**M-C-1-1** А.А.Храпов и др. Определение параметров плазмы токамака по кадрам обзорной видеокамеры

**M-C-1-4** М.Ю.Исаев и др. Моделирование нейтральной инжекции в квазистационарном сценарии токамака T-15МД

**M-C-1-6** А.И.Губанова и др. Экспериментальное определение влияния ферромагнитных конструкций на конфигурацию магнитного поля основных соленоидов в гиротронном зале установки токамак T-15МД

**M-C-1-12** В.И.Тепикин и др. Измерение спектров рентгеновского излучения пучков ускоренных электронов в токамаке T-15МД

**M-C-1-23** П.В.Минашин и др. Расчеты ЭЦ-генерации тока кодом GENRAY в токамаке T-15МД

**M-C-1-25** П.В.Саврухин и др. Исследование быстропеременных возмущений мягкого рентгеновского излучения в плазме токамаков T-10 и T-15МД

**M-C-2-1** Н.А.Кирнева и др. Влияние аспектного отношения установки на выбор геометрии ввода СВЧ-излучения в токамак T-15МД

**M-C-2-20** М.Г.Левашова и др. Интерпретация спектров мягкого рентгеновского излучения в токамаке T-15МД



# T-15МД на конференции

- M-C-2-22** Е.Д.Маренков и др. Влияние дрейфов и токов на основные параметры работы дивертора токамака T-15МД
- M-C-2-23** А.В.Сушков, К.А.Рогозин Система многоракурсных измерений мягкого рентгеновского излучения на токамаке T-15МД
- M-C-3-7** А.И. Аристов и др. Анализ сигналов нейтронных детекторов при развитии пучков ускоренных электронов на токамаке T-15МД
- M-C-3-9** Д.Л.Уласевич и др. Разработка алгоритма определения положения плазмы в токамаке T-15МД на основе синтетических диагностик
- M-C-3-21** А.П.Хвостенко и др. Система радиационного контроля на токамаке T-15МД
- M-C-3-22** А.Ю.Балашов и др. Регистрация МГД-активности в установке T-15МД
- M-C-3-23** Г.М.Асадулин и др. Статус тангенциальной системы томсоновского рассеяния на токамаке T-15МД
- M-C-3-24** А.С. Дрозд и др. Флуктуации плотности плазмы в сигналах СВЧ-интерферометра токамака T-15МД, вызванные пилообразными колебаниями и МГД возмущениями
- M-C-3-25** С.В. Неудачин и др. Анализ пилообразных колебаний плотности при нецентральной ЭЦРН в токамаке T-15МД
- M-C-3-26** Д.В.Сарычев и др. Измерение радиационных потерь на токамаке T-15МД
- M-C-3-27** К.А. Рогозин и др. Ленгмюровские зонды токамака T-15МД. Измерение параметров периферийной плазмы в диверторной и лимитерной конфигурациях



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

