



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ»



Область рабочих параметров токамака МИФИСТ: предварительная оценка

Кирнева Н.А.^{1,2}, Воробьев Г.М.², Ганин С.А.², Дрозд А.С.², Кудашев И.С.²,
Кулагин В.В.², Курнаев В.А.²

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
пл. Академика Курчатова, д.1., 123182, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Каширское шоссе, д.31, 115409, Москва, Россия

Статья для журнала «ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез»

Структура статьи

- Введение
- Определение операционных пределов токамака МИФИСТ
(докладчик Кудашев И.С.)
- Предварительное моделирование разрядов в токамаке МИФИСТ-0 (докладчик Кирнева Н.А.)
 - ✓ *Цели моделирования*
 - ✓ *Используемая модель*
 - ✓ *Расчеты для установки МИФИСТ-0*
- Возможные режимы удержания в токамаке МИФИСТ
- Заключение

Операционные пределы токамака МИФИСТ

ПОДГОТОВИЛ

СТУДЕНТ ГРУППЫ М19-208 КУДАШЕВ ИВАН

Введение

По существующим скейлингам и эмпирическим законам возможно определить область рабочих значений тока и плотности плазмы токамака

С помощью этого можно сравнить физические и технические возможности установки

Также можно провести первые, оценочные моделирования разрядов

Помимо этого, становится возможным сравнение с другими установками

Характеристики токамака МИФИСТ

	R_0 , см	a , см	A	k	δ	B_T , Т
МИФИСТ-0	25	13	1,9	2	0,3...0,5	0,24-0,5
МИФИСТ-1	25	13	1,9	2,5; 3	0,3...0,5	до 3

[1] Курнаев В.А. и др. Вестник НИЯУ МИФИ 8 (2019) 491

Ограничения по току

Границы по току определялись по значениям q (запас устойчивости) на границе плазменного шнура:

- Максимальный ток соответствовал $q=2$
- Минимальный (нестрогое условие) $q=15$

$$q = \frac{5a^2 B_T}{I_p R_0} \cdot f_1(k, \delta) \cdot f_2(A)$$
$$f_1(k, \delta) = \frac{1 + k^2(1 + 2\delta^2 - 1,2\delta^3)}{2} \quad f_2(A) = \frac{1,17 - 0,65/A}{(1 - A^{-2})^2} \quad A = R/a$$

где a — малый радиус плазменного шнура [м], B_T — тороидальное магнитное поле [Т], I_p — ток плазмы [МА], R_0 — большой радиус тора [м], k — вытянутость плазмы, δ — треугольность плазмы.

Ограничения на плотность плазмы

Область малых плотностей ограничивается пределом по развитию пучков убегающих электронов (предел Разумовой):

$$n_{e, \text{min}} = 0,07 \frac{I_p}{\pi k a^2}$$

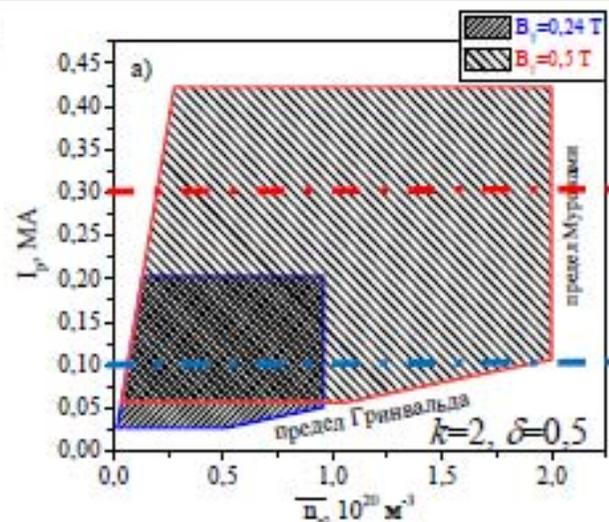
Максимальная плотность определялась по минимальному значению из двух пределов: предела Гринвальда и Мураками

$$n_{e, \text{Gw}} = \frac{I_p}{\pi a^2}$$

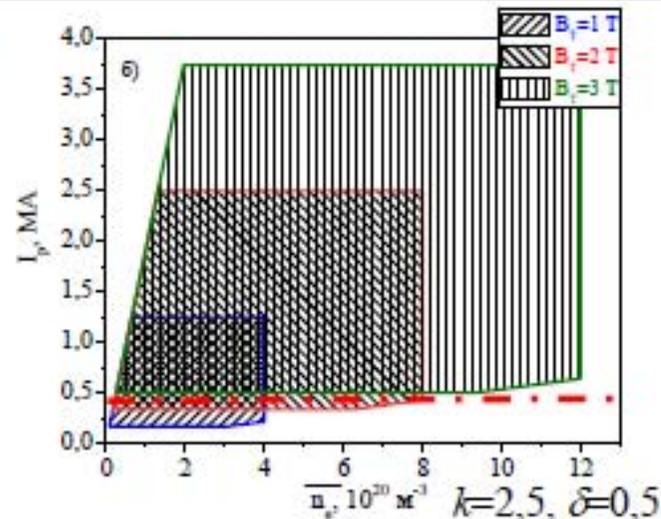
$$n_{e, \text{max}} = \frac{B_T}{R}$$

Диаграммы Хьюгилла для токамаков МИФИСТ-0 и МИФИСТ-1

МИФИСТ-0



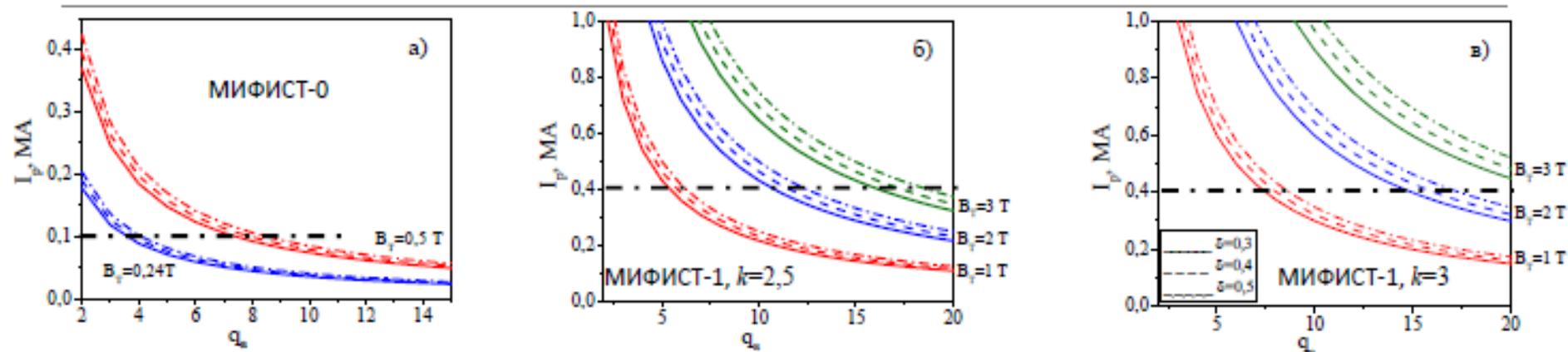
МИФИСТ-1



Из формулы запаса устойчивости следует, что фактор f_2 меняется от 2,8 при $k=2$, $\delta=0,3$ до 6,5 ($k=3$, $\delta=0,5$), $f_2=1,56$, следовательно, предельно допустимый (по физическим ограничениям) ток плазмы возрастает более, чем в 4 раза

Однако в реальности сила тока будет ограничена техническими возможностями системы создания тока: согласно[1] для на начальном этапе предельный ток 0,1 МА, затем он может быть увеличен до 0,3-0,4 МА

Влияние магнитного поля и геометрических факторов



Изменение магнитного поля (при фиксированных k и δ) приводит к более сильному смещению рабочих параметров по сравнению с изменением треугольности и вытянутости при фиксированном значении B_T

Ограничения по плотности

Предел Мураками прямо пропорционален величине B_T , следовательно, увеличение B_T приводит к существенному увеличению допустимой плотности плазмы

Однако при относительно малых технически допустимых токах плазмы максимальное значение плотности ограничивается пределом Гринвальда

Также достижение высоких плотностей является интересной задачей:

- при заполнении плазмы с помощью газонапуска, увеличение плотности требует высоких потоков рабочего газа на периферии, что будет приводить к охлаждению периферийной плазмы, что в свою очередь может инициировать развитие МГД-неустойчивостей. Важную роль будут играть рецилинг и взаимодействие
- заполнение плазмы с помощью напуска газа со стороны слабого поля при высоких плотностях может оказаться неэффективным [1]. Продвижение по плотности потребует либо напуска газа со стороны сильного поля, либо использования альтернативных методов напуска газа, например, инъекции сверхзвуковой струи [1].

[1] Gusev V.K., Alladio F., Morris A.W. *Plasma Phys. Control. Fusion* 45 (2003) A59

Заключение

По результатам оценок области операционных параметров можно сделать вывод, что рабочие параметры ограничены не столько физическими причинами, сколько техническими

Данное заключение, дает повод продвигаться в сторону улучшения технических возможностей токамака МИФИСТ

Выводы статьи по этому разделу

1. Представлены оценки операционных пределов по току и плотности плазмы для сферического токамака МИФИСТ (для модификаций МИФИСТ-0 и МИФИСТ-1).

2. Показано, что теоретически возможные значения тока плазмы существенно превосходят величины, ограниченные системой электропитания и параметрами индуктора.

При техническом ограничении $I_p \sim 0,1$ МА МИФИСТ-0 будет работать при $q_a > 3,5$.
При $I_p \sim 0,3$ МА рабочая область установки МИФИСТ-1 соответствует $q_a > 7$.

3. Показано, что ожидаемые величины предельной плотности для рабочих значений токов плазмы оказываются довольно высокими, $n_e > 10^{20} \text{ м}^{-3}$.
Продвижение в эту область может потребовать решения физических и технологических задач, связанных с выбором оптимального алгоритма подготовки стенки камеры к рабочему режиму, выбору способа заполнения плазмы, выбору материала первой стенки.

Предварительное моделирование разрядов в токамаке МИФИСТ-0

Электронный теплоперенос

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (n_e T_e) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho \Gamma_e) + q_{OH} - q_{ei} + q_e^{ion}$$

$$\Gamma_e = \Gamma_e^{conv} + \Gamma_e^{an} + \Gamma_e^{PC}$$

$$\Gamma_e^{conv} = \frac{5}{2} T_e \Gamma_n$$

$$\Gamma_e^{an} = n_e \chi_e^{an} \frac{\partial T_e}{\partial \rho}, \text{ где } \chi_e^{an} = \alpha_e^{an} \frac{\sqrt{T_{e,a/2}}}{n_{e,a/2} R_0}$$

$$\Gamma_e^{PC} = n_e \chi_e^{PC} \frac{\partial T_e}{\partial \rho} - n_e v_p^{PC} T_e, \text{ где}$$

$$\chi_e^{PC} = \alpha_e^{PC} \cdot q_a \cdot \left(\frac{a}{R} \right) \cdot q_{a/2} \cdot \sqrt{T_{e,a/4}} \cdot \frac{\bar{n}_e}{B_T n_e} \quad \text{и}$$

$$v_p^{PC} = \frac{2}{3} \gamma_{PC} \cdot \frac{2\rho / a}{1 + \rho^2} \chi_e^{PC}$$

Предварительное моделирование разрядов в токамаке МИФИСТ-0

Ионный теплоперенос

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (n_i T_i) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho \Gamma_i) + q_{ei} + q_i^{ion} + q_{cx}$$

$$\Gamma_i = \Gamma_i^{conv} + \Gamma_i^{neo}$$

$$\Gamma_i^{conv} = \frac{5}{2} T_i \Gamma_n$$

$$\Gamma_i^{neo} = n_i \chi_i^{neo} \frac{\partial T_i}{\partial \rho}$$

Уравнение переноса частиц решалось с условием Γ_n : $\bar{n}_e = const$

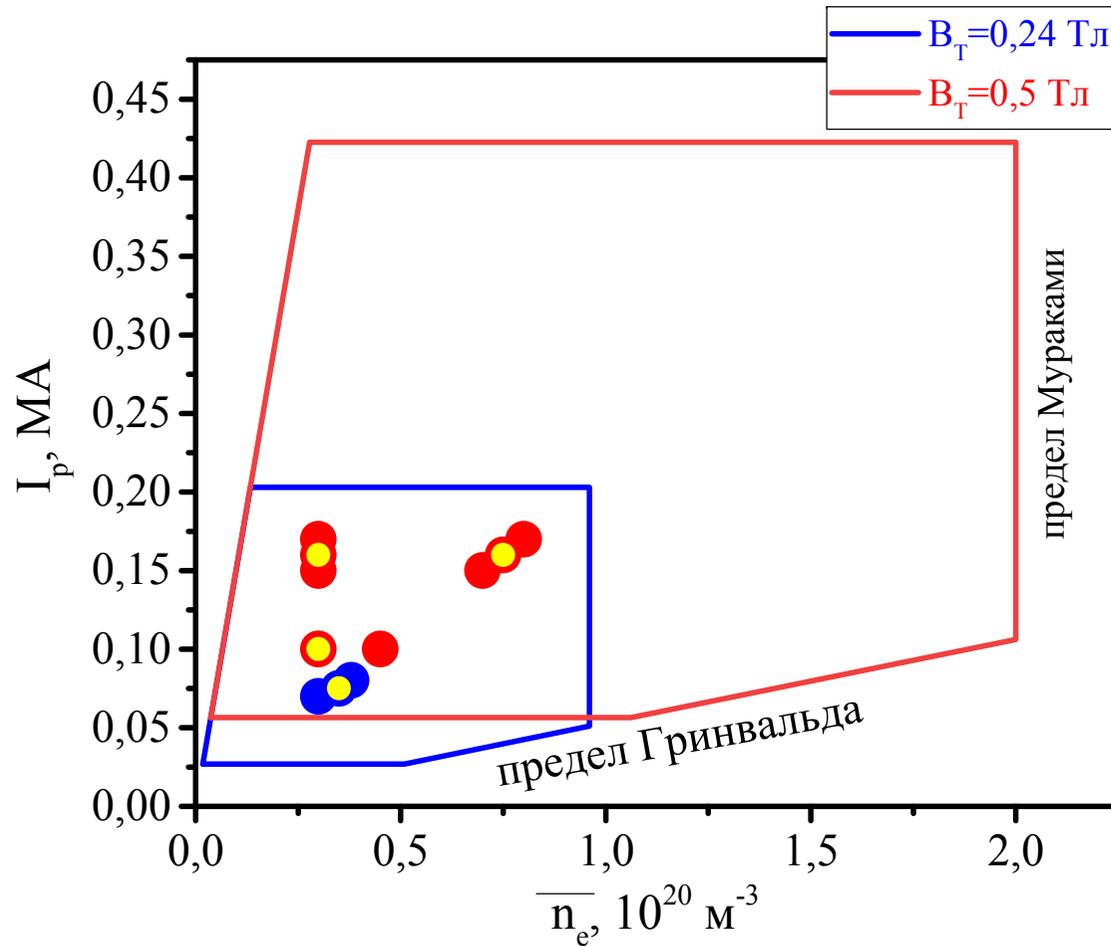
Уравнение диффузии тока в следующих предположениях:

- неоклассическая проводимость
- ПК по модели Б.Б.Кадомцева
- бутстреп-ток

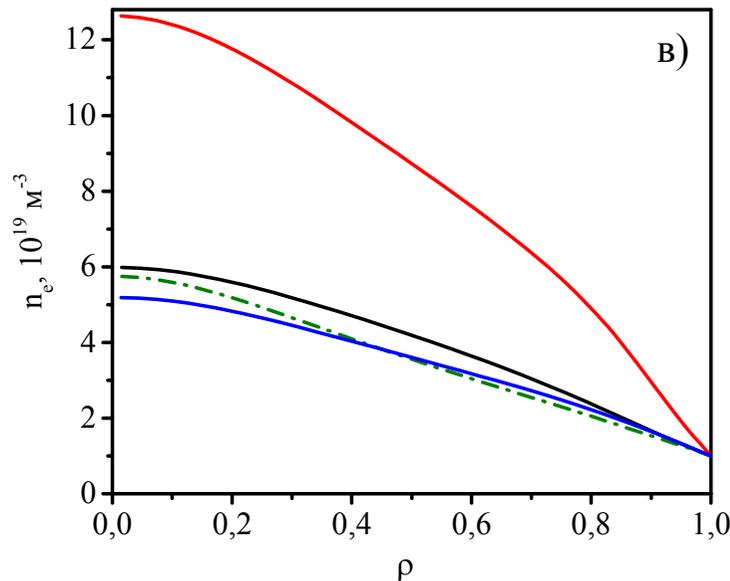
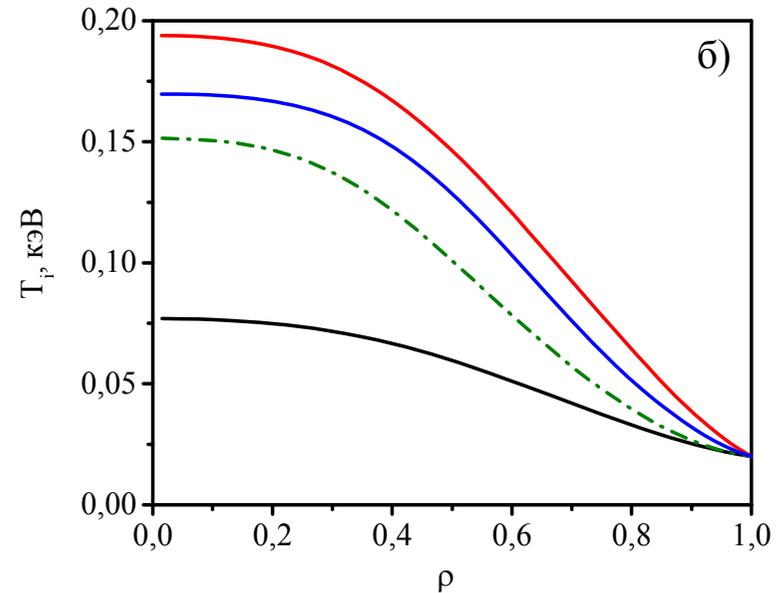
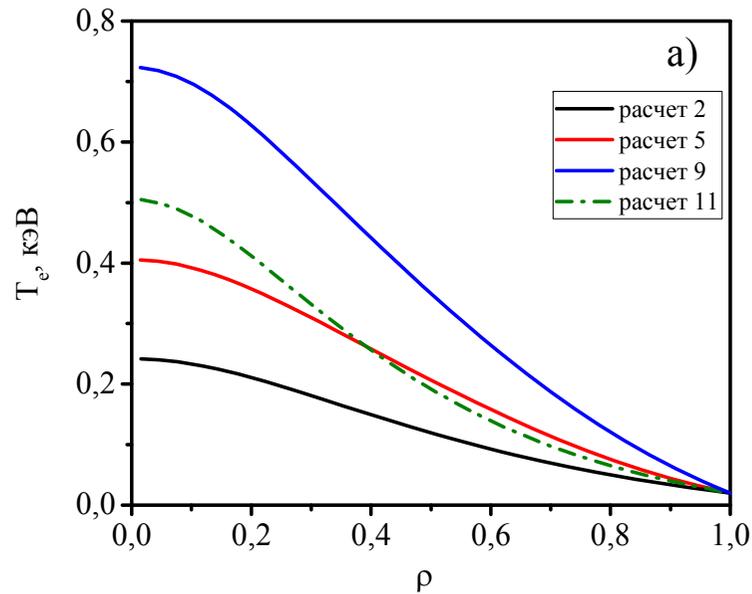
Предварительное моделирование разрядов в токамаке МИФИСТ-0

	I_p , кА	B_T , Тл	k	δ	\overline{n}_e , 10^{20} м^{-3}
1.	70	0,24	2	0,3	0,3
2.	75			0,4	0,35
3.	80			0,5	0,38
4.	150	0,5	2	0,3	0,7
5.	160			0,4	0,75
6.	170			0,5	0,8
7.	100			0,4	0,45
8.	150	0,5	2	0,3	0,3
9.	160			0,4	0,3
10.	170			0,5	0,3
11.	100			0,4	0,3 ¹⁵

Предварительное моделирование разрядов в токамаке МИФИСТ-0



Предварительное моделирование разрядов в токамаке МИФИСТ-0



Расчет 2 и 9

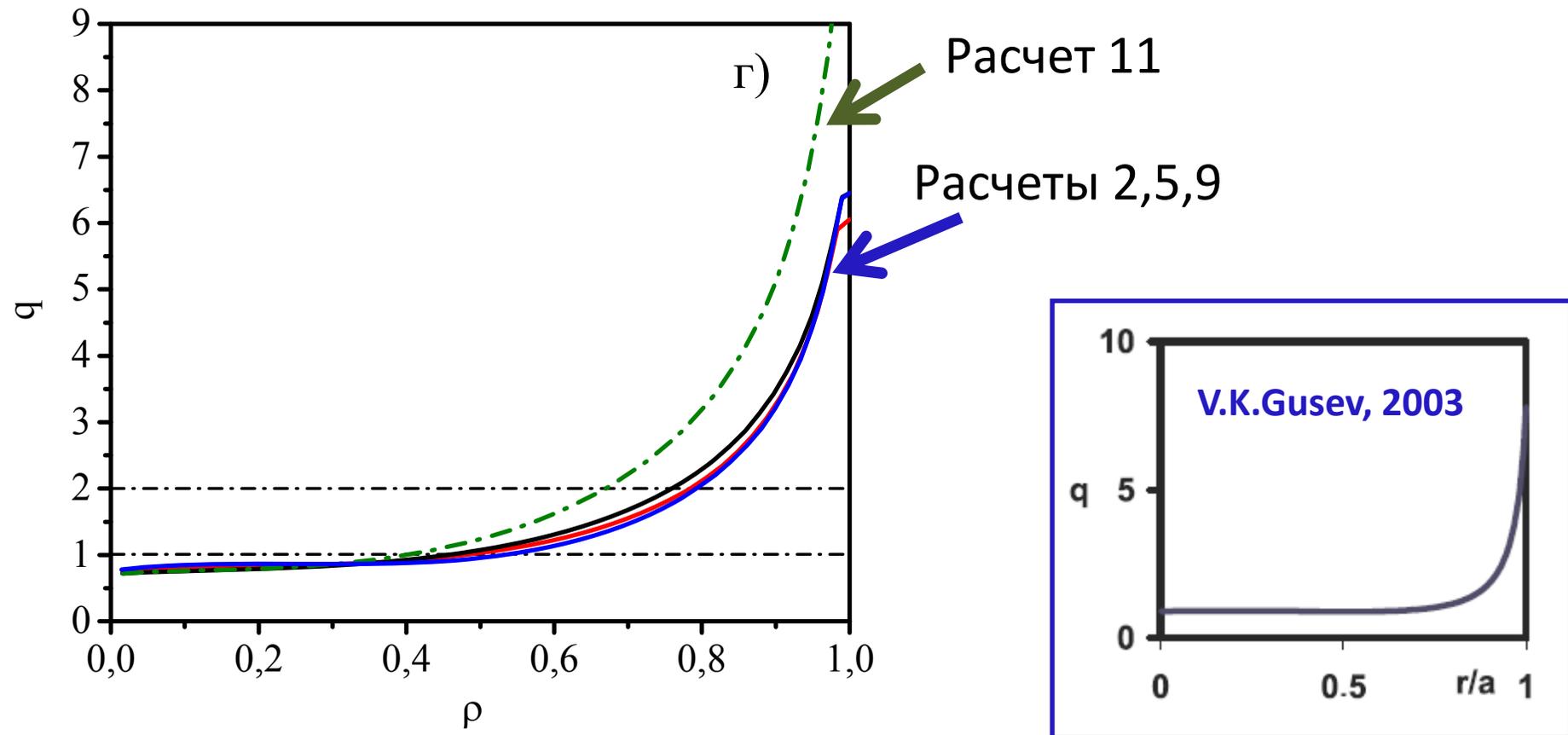
- одинаковые q_a , одинаковые n_e
- разные $V_T \Rightarrow$ разные I_p

Расчеты 9 и 11 – различные q_a

Расчет 2 и 5

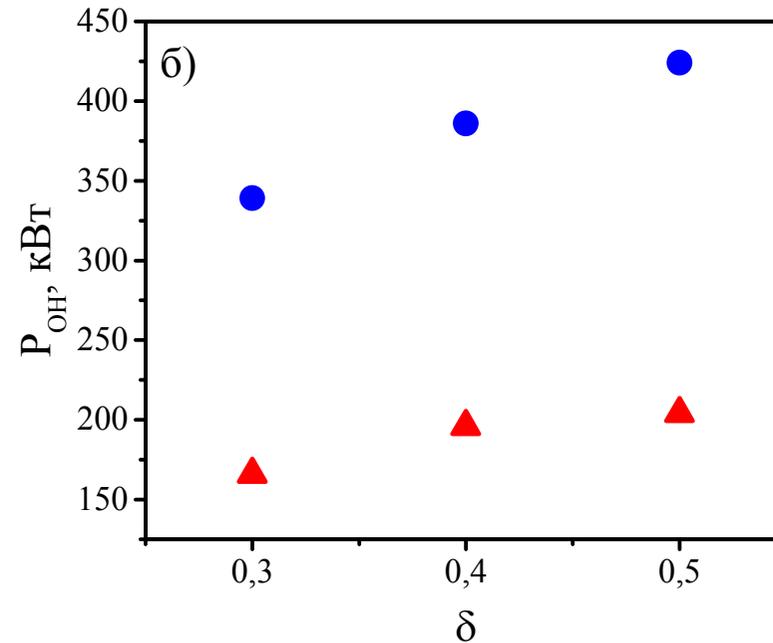
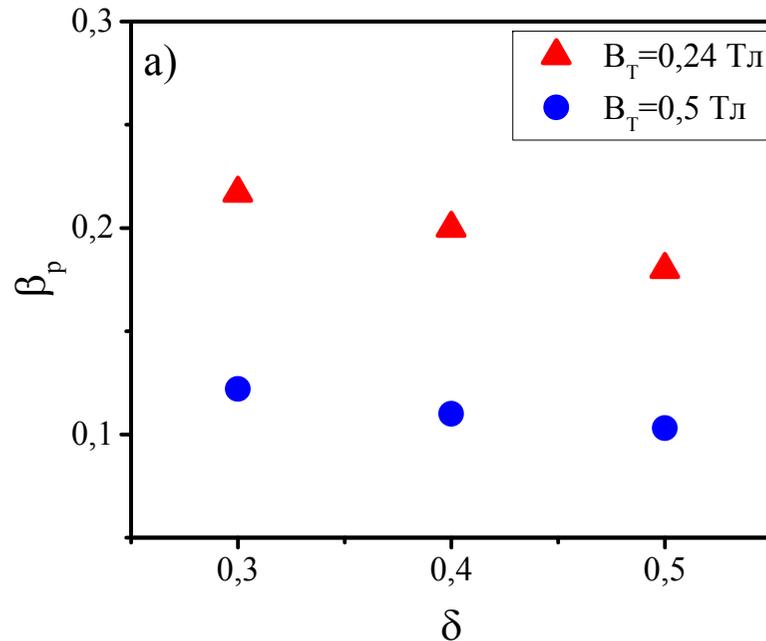
- одинаковые q_a ,
- одинаковые n_e/n_{GW}
- разные $V_T \Rightarrow$ разные I_p и n_e

Предварительное моделирование разрядов в токамаке МИФИСТ-0



- Широкая область низкого шира в центре
- Высокий магнитный шир во внешней трети шнура
- Широкая область $q=1$ – амплитуда ПК???
- $\rho(q=2) \sim 0.8$ при $q_a \sim 6$, $\rho(q=2) \sim 0.7$ при $q_a \sim 9$

Предварительное моделирование разрядов в токамаке МИФИСТ-0



Расчетные значения β_p и мощности омического нагрева плазмы для параметров установки МИФИСТ-0 в режимах с разной треугольностью плазмы ($q_a \sim 6$ и $\bar{n}_e \cong 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$).

$\tau_E \sim 1$ мс согласуется с нео-Аалкаторным скейлингом при $\bar{n}_e \cong 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

$$\tau_E^{neo-Alc} \sim 1,2 - 1,4 \text{ мс}$$

$$\tau_E^{neo-Alc} = 0,07 \cdot \bar{n}_e \cdot q_a \cdot k^{0,5} \cdot R_0 \cdot a$$

Возможные режимы удержания в токамаке МИФИСТ

1. Скейлинг ИТЭР

$$P_{th}^{L-H} = 0,042 \cdot \bar{n}_e^{0,73} \cdot B_T^{0,74} \cdot S^{0,98}$$

2. Скейлинг сферических токамаков (MAST, NSTX)

$$P_{th}^{L-H} = 0,072 \cdot \bar{n}_e^{0,7} \cdot B_T^{0,7} \cdot S^{0,9} \left(\frac{z_{eff}}{2} \right)^{0,7} \cdot F(A) \quad , \text{ где}$$

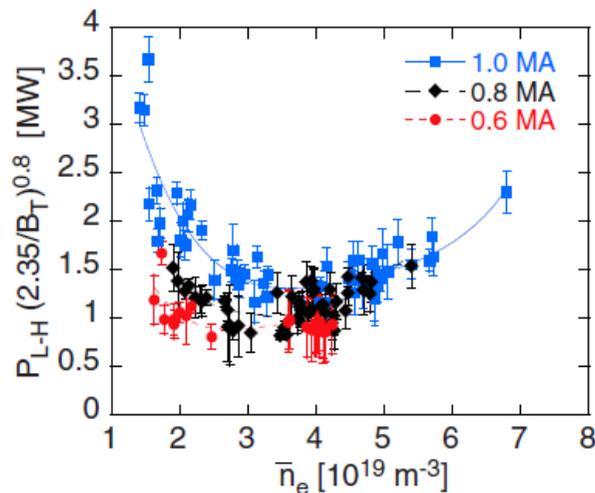
$$F(A) = \frac{\sqrt{0,1 \cdot A}}{\sqrt{1 - \sqrt{\frac{2}{1+A}}}}; \quad A = R / a$$

3. Скейлинг , учитывающий состав рабочего газа

$$P_{th}^{L-H} = 0,082 \cdot \bar{n}_e^{0,69} \cdot B_T^{0,91} \cdot S^{0,96} \cdot M^{-1}$$

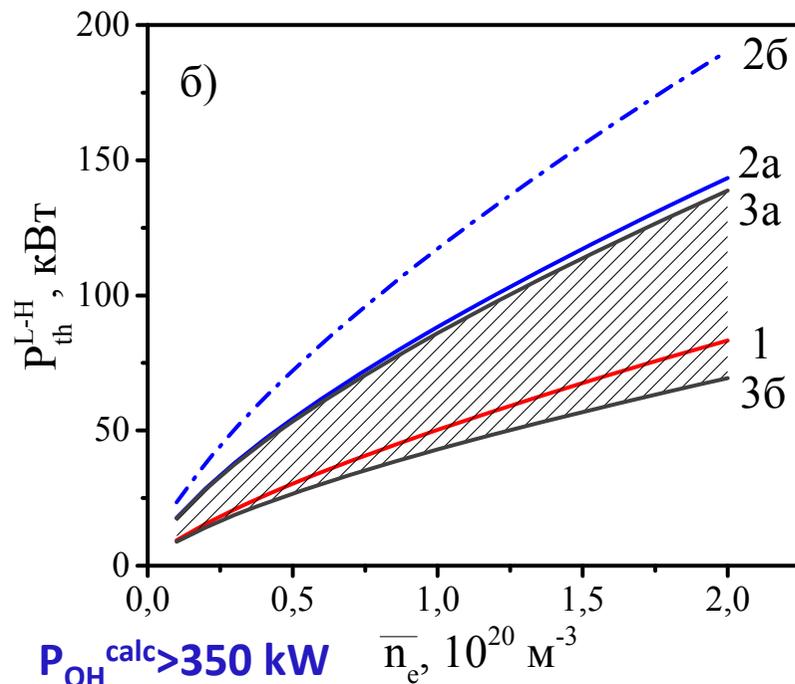
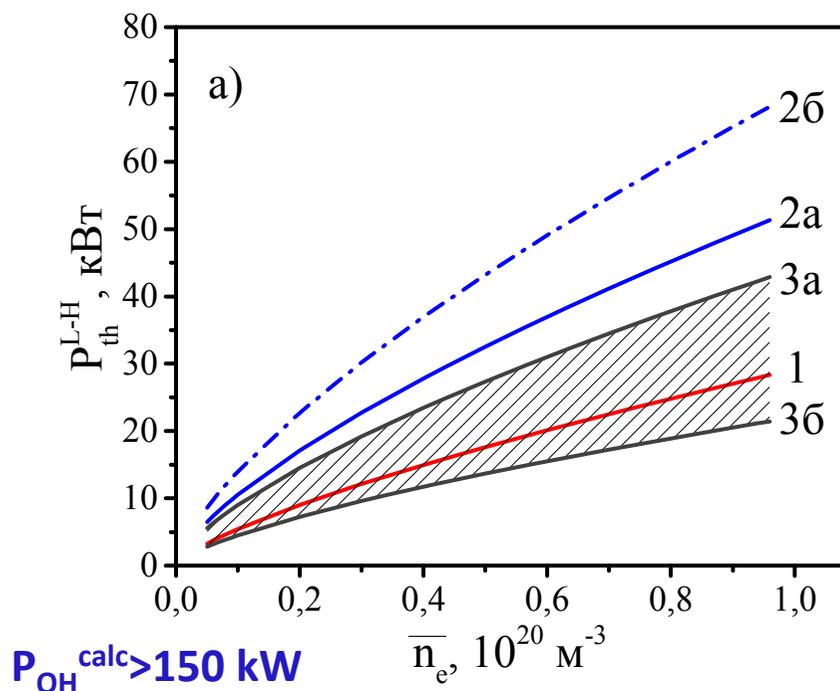
Оценки пороговой мощности L-H перехода

Конфигурация	k	δ	B_T , Т	I_p , кА	z_{eff}	$\bar{n}_e^{\text{min}}, 10^{20} \text{ м}^{-3}$
МИФИСТ-0	2	0,4	0,24	75	2; 3	0,1
	2		0,5	160	2; 3	0,2
МИФИСТ-1	2,5	0,4	1	460	2; 3	0,49



$$\bar{n}_e^{\text{min}} = 0,07 \cdot I_p^{0,34} \cdot a^{-0,95} \cdot B_T^{0,62} \cdot \left(\frac{R}{a}\right)^{0,4}$$

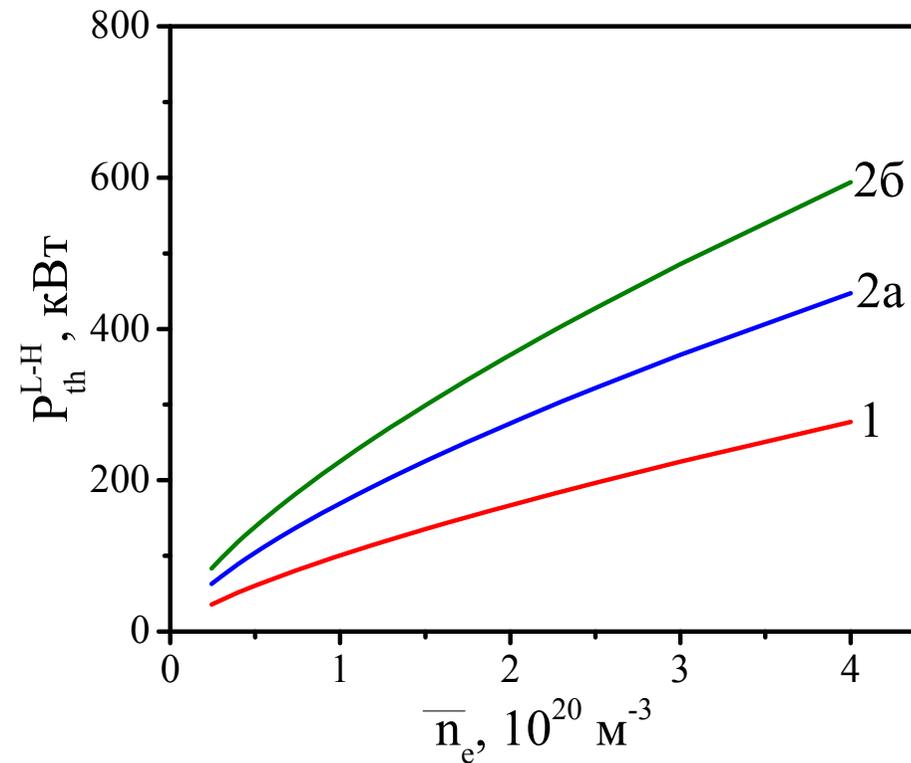
Оценки пороговой мощности L-N перехода



Зависимость пороговой мощности L-N перехода для токамака МИФИСТ-0:
(а) для $B_T = 0,24 \text{ Тл}$; (б) для $B_T = 0,5 \text{ Тл}$.

Кривые 1 соответствуют расчетам по скейлингу ИТЭР,
кривые 2 - скейлингу для сферических токамаков : 2а для $z_{eff} = 2$, 2б для $z_{eff} = 3$;
кривые 3 соответствуют расчетам по скейлингу ITER, учитывающему влияние
состава рабочего газа: кривая 3а для водорода, кривая 3б для дейтерия.

Оценки пороговой мощности L-H перехода



Зависимость пороговой мощности L-H перехода для токамака МИФИСТ-1 для $B_T=1$ Тл. Кривые 1 соответствуют расчетам по скейлингу ИТЭР, кривые 2 - скейлингу для сферических токамаков : 2а для $z_{eff}=2$, 2б для $z_{eff}=3$.

Выводы (моделирование)

- Проведено моделирование стационарной стадии разрядов токамака МИФИСТ-0 для различных значений V_T и треугольности плазмы. Показано, что ожидаемый профиль $q(\rho)$ соответствует типичному распределению тока для сферических токамаков: широкая область низкого магнитного шира в центральной части плазмы и высокий магнитный шир во внешней трети плазменного шнура. Для режимов с относительно низкими q_a , $q_a < 6$, это приводит к тому, что поверхность $q=2$ находится близко к границе плазмы ($\rho \sim 0,8$), что может инициировать развитие МГД неустойчивостей особенно в условиях высоких потоков нейтральных частиц со стенки.

Выводы (моделирование)

- Ожидаемые величины мощности омического нагрева плазмы, P_{OH} , полученные при моделировании разрядов токамака МИФИСТ-0, оказались достаточно высокими по сравнению с величиной пороговой мощности L-H перехода. Это означает, что уже в омических режимах токамака МИФИСТ-0 могут проявиться характерные особенности L-H перехода. Однако, для осуществления L-H перехода в токамаке МИФИСТ-1 потребуются дополнительный нагрев плазмы.

Таким образом, проведенный анализ рабочей области токамака МИФИСТ показывает широкие возможности установки для участия в решении актуальных задач физики токамаков.

Отечественные токамаки (2020 г.)

	R_0 , см	a, см	A	k	δ	B_T , Тл
МИФИСТ-0	25	13	1,9	2	0,3...0,5	0,24-0,5
МИФИСТ-1	25	13	1,9	2,5; 3	0,3...0,5	до 3
Глобус-М2	36	24	1,5	2,2	0,45	1,0
ФТ-2	55	8	6,9	1	0	2,2
Туман-3М	53	22	2,4	1	0	1,2
Т-11М	70	20	3,5	1	0	1
Т-15МД	150	67	2,2	до 1,8	до 0,45	2

Сферические токамаки

	R_0 , см	a , см	A	k	δ	V_T , Тл
МИФИСТ-0	25	13	1,9	2	0,3...0,5	0,24-0,5
МИФИСТ-1	25	13	1,9	2,5; 3	0,3...0,5	до 3
Глобус-М2	36	24	1,5	2,2	0,45	1,0
MAST Upgrade	85	65	1,3	2,5	0,45	0,92
NSTX-U	93	62	1,5	2,8	до 0,7	1,0
ST-40	40	24	1,7	2,5	0,3	3,0