

УДК 621.039.623

## РАСЧЁТЫ УСТАВОК В СХЕМАХ ЗАЩИТ И БЛОКИРОВОК СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ОБМОТОК И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ РАЗРЯДОВ В ТОКАМАКЕ Т-15МД

*П.П. Хвостенко<sup>1</sup>, Э.Н. Бондарчук<sup>2</sup>, А.А. Кавин<sup>2</sup>, В.М. Леонов<sup>1</sup>, А.Н. Чудновский<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» завершается строительство токамака Т-15МД. Магнитная система токамака Т-15МД должна обеспечить получение и удержание горячей плазмы в диверторной конфигурации. Проектные параметры плазмы следующие: большой радиус 1,48 м, малый радиус 0,67 м, вытянутость 1,7—1,9 и треугольность 0,3—0,4, ток плазмы 2 МА, торoidalное магнитное поле на оси плазмы 2 Тл. Электромагнитная система включает торoidalную и полоидальную обмотки. Установка будет оборудована системой дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока в квазистационарных разрядах длительностью сотни секунд. Сценарии квазистационарных плазменных разрядов определяются возможностями электромагнитной системы по созданию и удержанию равновесной магнитной конфигурации плазменного шнуря. Безаварийная работа электромагнитной системы обеспечивается системой защит и блокировок. Данная работа посвящена расчётом максимальной длительности токов в торoidalной и полоидальных обмотках во избежание их перегрева, а также длительности и сценариев квазистационарных плазменных разрядов.

**Ключевые слова:** токамак, плазма, диверторная конфигурация, магнитная система, торoidalная обмотка, полоидальные обмотки, система электропитания, система защит и блокировок, система водяного охлаждения, длительность разряда, программа расчёта.

## CALCULATIONS OF SETTINGS IN THE PROTECTION AND BLOCKING CIRCUITS OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF ELECTROMAGNETIC WINDINGS AND THE DURATION OF PLASMA DISCHARGES IN T-15MD TOKAMAK

*P.P. Khvostenko<sup>1</sup>, E.N. Bondarchuk<sup>2</sup>, A.A. Kavin<sup>2</sup>, V.M. Leonov<sup>1</sup>, A.N. Chudnovskiy<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC «NIIIEFA», St. Petersburg, Russia

At the present time, the construction of the T-15MD Tokamak is being completed in the NRC Kurchatov Institute. The magnet system of the Tokamak T-15MD should provide obtaining and confinement the hot plasma in the divertor configuration. The design plasma parameters are as follows: a major radius of 1.48 m, a minor radius of 0.67 m, an elongation of 1.7—1.9 and a triangularity of 0.3—0.4, plasma current 2 MA, toroidal magnetic field on the plasma axis 2 T. The electromagnetic system includes toroidal and poloidal coils. The installation will be equipped with the auxiliary plasma heating and current drive in quasi-stationary discharges lasting hundreds of seconds. Scenarios of quasi-stationary plasma discharges are determined by the capabilities of the electromagnetic system to create and maintain an equilibrium magnetic configuration of the plasma column. Trouble — free operation of the power supply is provided by protection and blocking system. This work is devoted to calculations of the maximum duration of currents in toroidal and poloidal windings in order to avoid their overheating, as well as the duration and scenarios of quasi-stationary plasma discharges.

**Key word:** tokamak, plasma, divertor configuration, magnetic system, toroidal and poloidal coils, power supply system, protection and blocking system, water cooling system, discharge duration, calculation program.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-60-70

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных целей, стоящих при создании термоядерных и гибридных реакторов на основе токамаков, является обеспечение работы в стационарных или квазистационарных режимах. Длительность разрядов современных токамаков (EAST [1], KSTAR [2]) с термоядерными параметрами плазмы ограничивалась временем порядка 100 с. Понимание процессов, приводящих к ограничению длительности разрядов, представляет собой актуальную задачу. В этой связи очень важно знать возможности токамака Т-15МД для осуществления квазистационарных плазменных режимов.

Электромагнитная система (ЭМС) установки токамак Т-15МД предназначена для генерирования торoidalных и полоидальных магнитных полей [3, 4] с целью создания и удержания высокотемпературной плазмы. ЭМС Т-15МД обеспечивает величину торoidalного магнитного поля на оси плазменного шнуря 2 Тл при длительности 10 с, достижение тока плазмы 2 МА. Режим охлаждения торoidalной и полоидальных обмоток ЭМС Т-15МД был выбран с расчётом на их перегрев не более чем на 60 °С и возможностью охлаждения за период между импульсами 15 мин.

Для нормальной безаварийной эксплуатации токамака Т-15МД должны быть определены уставки по величине и длительности токов в системе защит и блокировок электропитания тороидальной обмотки, а также обмоток индуктора и управления. Необходимо определить, за какое время в зависимости от величины токов в обмотках последние не перегреются более чем на 60 °C. Величина перегрева 60 °C была выбрана с некоторым запасом (во избежание закипания дистиллированной воды на выходе из обмоток) в связи с возможностью неполного её охлаждения до первоначального уровня при циркуляции в замкнутом контуре системы охлаждения за время 15 мин между импульсами и, как следствие, постепенном повышении входной температуры. В этой связи необходимо будет ввести в систему защиты также уставки по наличию (отсутствию) расхода воды в обмотках, по температуре выходящей воды из обмоток ( $\Delta T \leq 60$  °C), а также по величине входной температуры воды не более 30 °C — это уставки по максимальной длительности протекания токов в обмотках, температуре и наличию (отсутствию) воды. Уставки по максимальной амплитуде тока в обмотках во избежание их механического повреждения определены проектом и составляют превышение над максимальным током для каждой из обмоток не более 10%. Время достижения разрешённого перегрева обмоток определяет возможную длительность плазменных разрядов.

## СОСТАВ И ПАРАМЕТРЫ ЭМС Т-15МД

В состав ЭМС Т-15МД входят:

- обмотка тороидального поля (ОТП), состоящая из 16 D-образных катушек;
- обмотка индуктора (ОИ), состоящая из трёх катушек;
- шесть обмоток управления (ОУ1—ОУ6);
- обмотка горизонтального управляющего поля (ОГУП), состоящая из четырёх катушек.

Параметры обмотки тороидального поля:

Число катушек . . .	16
Число витков в катушке . . .	50
Проводник . . .	Медный серебросодержащий
Площадь и диаметр проводника, мм . . .	22,5×32, Ø10,5
Площадь поперечного сечения меди, мм <sup>2</sup> . . .	631,5
Длина проводника ОТП, м . . .	9120
Масса проводника, кг . . .	51 920
Максимальный ток, кА . . .	22
Максимальное напряжение на корпусной изоляции, кВ . . .	2
Омическое сопротивление ОТП при 20 °C, Ом . . .	0,26
Собственная индуктивность обмотки, Гн . . .	0,8
Число параллельных ветвей охлаждения . . .	64
Перегрев проводника при $B_t = 2$ Тл и времени плато 10 с, °C . . .	57
Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч . . .	43
Потери давления, МПа . . .	0,8

индуктора:	ОИ1	ОИ2	ОИ3
Число витков в обмотке . . .	151	457	151
Объём и диаметр проводника из серебросодержащей			
меди трапециoidalной формы, мм . . .	20×14,88×15,15, Ø 8		
Средняя длина витка, м . . .	2,11		
Длина проводника катушки, м . . .	638	1928	638
Масса меди, кг . . .	1420	4290	1420
Максимальный ток, кА . . .	±40	±40	±40
Омическое сопротивление обмотки при 20 °C, мОм . . .	11	34,3	11
Собственная индуктивность обмотки, мГн . . .	2,8	24,8	2,8
Число параллельных ветвей охлаждения . . .	4	4	4
Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч . . .	1,8	0,94	1,8
Потери давления, МПа . . .	0,8	0,8	0,8

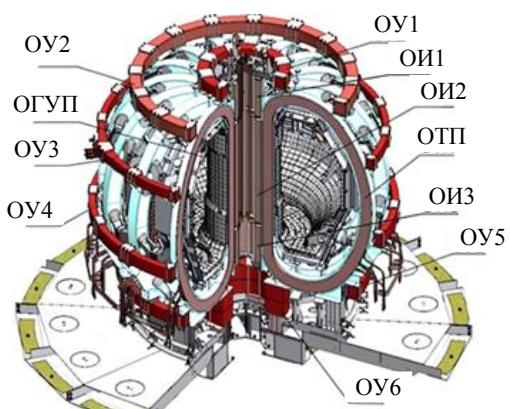


Рис. 1. ЭМС токамака Т-15МД

## Технические параметры обмоток управления:

	ОУ1	ОУ2	ОУ3	ОУ4	ОУ5	ОУ6	ОГУП
Число катушек . . .	1	1	1	1	1	2	4
Число секций в катушке . . .	5	5	4	5	5	6	1
Число витков в катушке . . .	100	100	48	60	80	216	10
Площадь медного проводника							
и диаметр канала охлаждения, мм . . .	22×22, Ø10,5	23,5×23,5, Ø 8,8	22×22, Ø10,5	23,5×23,5, Ø 8,8	23,5×23,5, Ø 8,8	18×18, Ø 8	
Средняя длина витка, м . . .	5,47	14,6	19,1	20,4	16,5	4,67	12
Максимальный ток, кА . . .	15	12	15,5	17	17	20,5	10
Собственная индуктивность							
обмотки, мГн . . .	23	84	24	48	65	112	—
Число параллельных каналов . . .	5	10	8	10	10	12	1
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч . . .	3,9	4,0	3,8	4,5	4,3	9,0	1,4

## ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЁТА НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ОБМОТОК

Расчёты проводились с использованием программы для решения системы дифференциальных уравнений первого порядка, разрешённых относительно производной. Программа использует удобный интерфейс ввода и изменения коэффициентов системы уравнений, начальных значений и других параметров, необходимых для проведения расчётов, и снабжена системой графического отображения результатов вычислений. Программа изначально была разработана для расчётов нагрева сверхпроводящей обмотки тороидального поля токамака Т-15 при защитном выводе энергии во время возникновения и распространения нормальной фазы [5]. Для расчётов нагрева и охлаждения электромагнитных систем токамаков Т-15М [6] и Т-15МД дистиллированной водой она была соответствующим образом модернизирована.

Ввод токов в тороидальную и полоидальную обмотки осуществляется с помощью тиристорных преобразователей. Величина вводимого тока и его длительность определяются сценарием эксперимента.

Стадия подъёма тока в катушке (обмотке) описывается уравнениями

$$\frac{dT_w}{dt} = F_{\text{tw}} \frac{\alpha P_{\text{tube}} (T_{\text{CU}} - T_w)}{\rho_w C_w S_w} - F_{\text{dm}} \frac{T_w - T_{w\_in}}{L_{\text{cond}} \rho_w S_w} \frac{\dot{m}}{N_{\text{block}}};$$

$$\frac{dT_{\text{CU}}}{dt} = \frac{I^2 \rho^\sigma / S_{\text{sb}} - F_w \alpha P_{\text{tube}} (T_{\text{CU}} - T_w)}{C_{\text{sb}} \rho_{\text{sb}} S_{\text{sb}} + F_{\text{ins}} C_{\text{ins}} \rho_{\text{ins}} S_{\text{ins}}}; \frac{dI}{dt} = \frac{U_{\text{up}} - I \rho^\sigma L_{\text{wind}} / S_{\text{sb}}}{L}.$$

Описание переменных и параметров уравнений представлено в табл. 1.

Таблица 1. Описание переменных и параметров уравнений

Параметр	Описание	Способ задания
$t$	Время, с	Переменная интегрирования
$T_w$	Температура воды, °C	Расчётная переменная
$T_{\text{CU}}$	Температура проводника, °C	—“—
$T_{w\_in}$	Температура воды на входе в обмотку, °C	Задаваемое значение
$I$	Ток в обмотке, А	Расчётная переменная
$C_w = C_w(T_w)$	Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)	Таблица
$C_{\text{sb}} = C_{\text{sb}}(T_{\text{CU}})$	Удельная теплоёмкость проводника, Дж/(кг·°C)	—“—
$C_{\text{ins}} = C_{\text{ins}}(T_{\text{CU}})$	Удельная теплоёмкость изоляции, Дж/(кг·°C)	—“—
$\rho_w = \rho_w(T_w)$	Плотность воды, кг/м <sup>3</sup>	—“—
$\rho_{\text{sb}}$	Плотность материала проводника, кг/м <sup>3</sup>	Задаваемое значение
$\rho_{\text{ins}}$	Плотность материала изоляции, кг/м <sup>3</sup>	—“—
$d_{\text{hyd}}$	Гидравлический диаметр канала, м	—“—
$S_{\text{wat}} = \pi d_{\text{hyd}}^2 / 4$	Площадь поперечного сечения канала, м <sup>2</sup>	Вычисляется
$P_{\text{tube}} = \pi d_{\text{hyd}}$	Периметр канала, м	Вычисляется по диаметру $d_{\text{hyd}}$
$S_{\text{sb}}$	Площадь сечения проводника, м <sup>2</sup>	Задаваемое значение
$S_{\text{ins}}$	Площадь сечения изоляции, м <sup>2</sup>	—“—
$\rho^\sigma = \rho^\sigma(T_{\text{CU}})$	Удельное сопротивление проводника, Ом·м	Таблица
$U_{\text{up}}$	Начальное напряжение (выпрямительный режим), В	Задаваемое значение
$N_{\text{block}}$	Количество катушек в обмотке	—“—
$N_{\text{turn}}$	Количество витков в катушке	—“—

$N_{\text{paral}}$	Количество витков, охлаждаемых параллельно	—“—
$L_{\text{turn}}$	Длина одного витка, м	—“—
$L_{\text{cond}} = L_{\text{turn}}N_{\text{turn}}$	Длина проводника в катушке, м	Вычисляется
$L_{\text{wind}} = L_{\text{cond}}N_{\text{block}}$	Полная длина проводника в обмотке, м	—“—
$L$	Индуктивность обмотки, Гн	Задаваемое значение
$\alpha = \alpha(T_w) = \text{Nu}\lambda/d_{\text{hyd}}$	Коэффициент теплопередачи между стенкой канала и водой, Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	Вычисляется
$\lambda = \lambda(T_w)$	Теплопроводность воды, Вт/(м·°C)	Таблица
$\text{Nu} = \text{Nu}(T_w) = 0,023R$	Число Нуссельта	Вычисляется
$\text{Re} = \frac{4\dot{m}}{N_{\text{block}}N_{\text{paral}}\pi d_{\text{hyd}}\eta}$	Число Рейнольдса	—“—
$\text{Pr} = \text{Pr}(T_w) = C_w\eta/\lambda$	Число Прандтля	—“—
$v$	Динамическая вязкость воды, Па·с	Таблица
$\dot{m}$	Полный расход воды через обмотку, кг/с (г/с)	Задаваемое значение
	Управляющие параметры	
	$F_w = 1$ нормальный режим	$F_w = 0$ , нет передачи тепла от воды к проводнику
	$F_{\text{ins}} = 1$ нормальный режим	$F_{\text{ins}} = 0$ , отсутствует теплоёмкость изоляции
	$F_{T_w} = 1$ нормальный режим	$F_{T_w} = 0$ , постоянная $T_w$
	$F_{\text{dm}} = 1$ учёт протока воды	$F_{\text{dm}} = 0$ , без учёта протока воды

На стадии стационарного тока

$$\frac{dI}{dt} = 0.$$

На стадии вывода тока

$$\frac{dI}{dt} = \frac{-U_{\text{down}} - I\rho^\sigma L_{\text{wind}}/S_{\text{sb}}}{L},$$

где  $U_{\text{down}}$  — напряжение для вывода тока (инверторный режим).

Выходной параметр — начальное сопротивление обмотки  $R_{\text{init}}$  вычисляется по формуле

$$R_{\text{init}} = \rho^\sigma(T_{\text{CU}}(t=0))L_{\text{wind}}/S_{\text{sb}}.$$

Выходной параметр — перепад давления воды  $\text{deltP}$  вычисляется по формуле

$$\text{deltP} = 2,5312 \cdot 10^{-5} \frac{(\dot{m}/N_{\text{block}}N_{\text{parall}})^2 L_{\text{cond}}/N_{\text{parall}}}{\pi^2 d_{\text{hyd}}^5 \text{Re}^{0,25} \rho_w(T_{w_{\text{in}}})}, \text{ атм.}$$

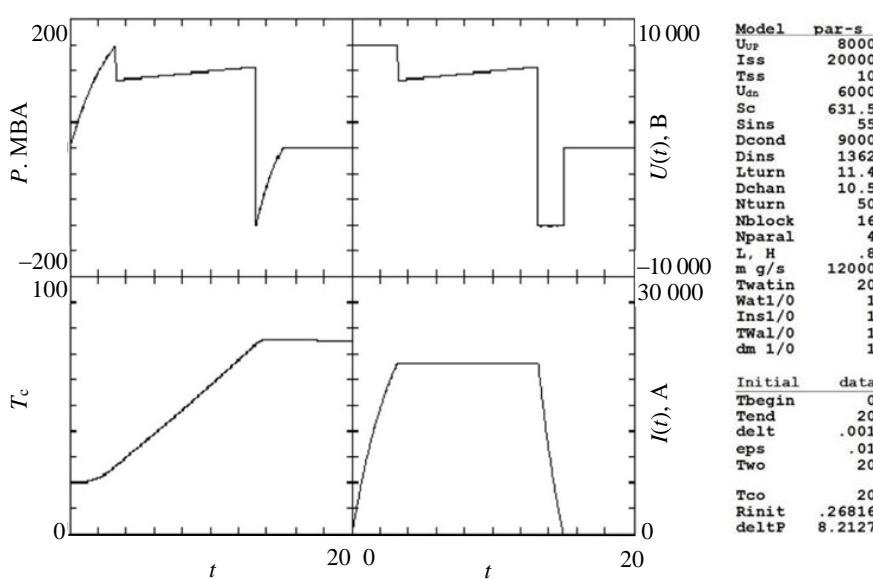


Рис. 2. Результат расчёта нагрева проводника обмотки тороидального поля (ОТП):  $T_c$  — температура проводника;  $P$  — активная мощность, потребляемая ОТП;  $I(t)$  — ток в обмотке;  $U(t)$  — напряжение на обмотке

Пример расчёта нагрева проводника обмотки тороидального поля (ОТП) приведён на рис. 2.

Параметры модели на рис. 2:  $U_{\text{up}}$  — напряжение на обмотке при вводе тока, В;  $I_{\text{ss}}$  — максимальная величина тока на плато, А;  $t_{\text{ss}}$  — длительность плато тока, с;  $U_{\text{dn}}$  — напряжение на обмотке во время вывода тока, В;  $S_c$  — площадь сечения проводника, мм<sup>2</sup>;  $S_{\text{ins}}$  — сечение изоляции проводника, мм<sup>2</sup>;  $D_{\text{cond}}$  — плотность материала проводника, кг/м<sup>3</sup>;  $D_{\text{ins}}$  — удельная плотность материала изоляции, кг/м<sup>3</sup>;  $L_{\text{turn}}$  — средняя длина витка в

катушке, м;  $D_{\text{chan}}$  — гидравлический диаметр проводника, мм;  $N_{\text{turn}}$  — число витков в катушке;  $N_{\text{block}}$  — число катушек в обмотке;  $N_{\text{paral}}$  — число параллельных каналов охлаждения в катушке;  $L$  — индуктивность обмотки, Гн;  $\dot{m}$  — суммарный расход воды через обмотку, г/с;  $T_{\text{wat in}}$  — входная температура воды.

Расход воды через обмотку задаётся таким образом, чтобы перепад давления воды не превышал 8 атм. (0,8 МПа).

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ УСТАВОК В СИСТЕМАХ ЗАЩИТ И БЛОКИРОВОК

По описанной программе проведены расчёты нагрева обмоток при различных токах, протекающих по обмоткам. Было определено время, за которое обмотки нагреваются на 60 °С. На рис. 3 показаны зависимости времени такого нагрева от величины токов, протекающих по обмоткам. Как видно на рис. 3, наиболее «слабыми» являются обмотки ОУ1 и ОУ3.

Ход кривых хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью вида

$$t, \text{с} = A1 \exp(-I/B1) + A2 \exp(-I/B2) + C,$$

где  $I$  — величина тока, кА.

Значения коэффициентов  $A1$ ,  $A2$ ,  $B1$ ,  $B2$  и  $C$  для всех обмоток приведены в табл. 2.

Пример аппроксимации для данных по нагреву обмотки индуктора ОИ2 показан на рис. 4.

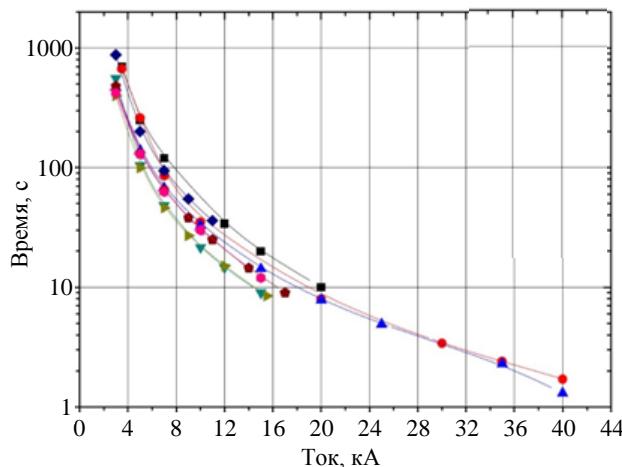


Рис. 3. Зависимость времени достижения перегрева проводника  $\Delta T \geq 60$  °С от величины токов, протекающих по обмоткам: ■ — ОПП; ● — ОИ1,3; ▲ — ОИ2, ▼ — ОУ1, ▲ — ОУ2, ▶ — ОУ3, ♦ — ОУ4, ★ — ОУ5, ● — ОУ6

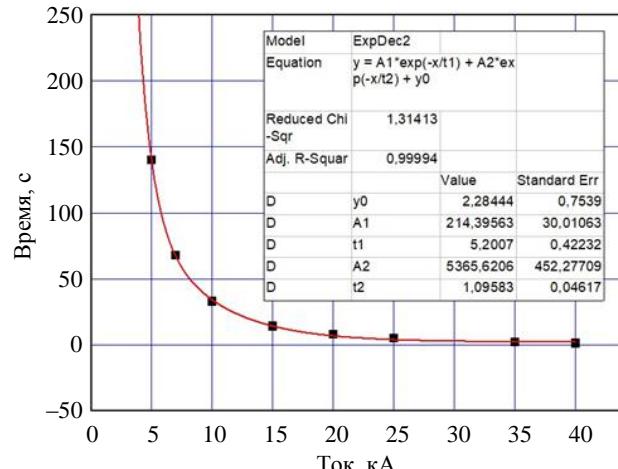


Рис. 4. Аппроксимация (—) расчётных данных (■) времени нагрева обмотки индуктора ОИ2 от длительности протекающего тока

Таблица 2. Значения коэффициентов

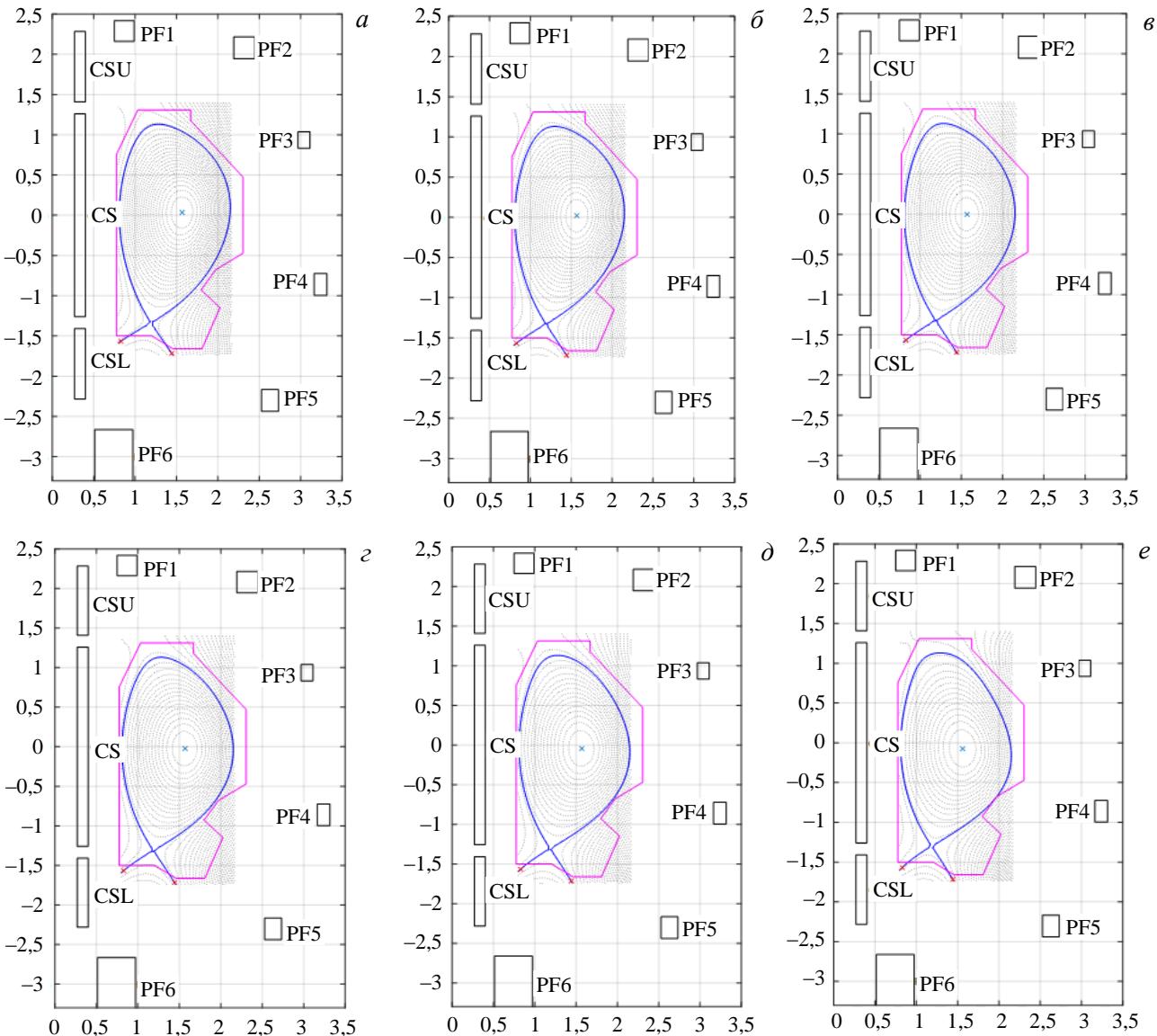
Коэффициент	ОИ1	ОИ3	ОИ2	ОУ1	ОУ2	ОУ3	ОУ4	ОУ5	ОУ6	ОПП
A1	7335	214,4	379,7	1247	202,5	27 841	379,6	756	771,56	
A2	77,9	5385	35 818	1247	4447	574	11 088	756	48 228	
B1	1,41	5,2	3,145	1,7	4,09	0,79	3,67	2,3	3,58	
B2	9,11	1,1	0,67	1,7	1,04	3,57	0,84	2,3	0,73	
C	0,5	2,64	5,9	23	4,0	9,2	5,64	9,78	7,5	

Примечание:  $t, \text{с} = A1 \exp(-I/B1) + A2 \exp(-I/B2) + C$ ,  $I$  — ток в обмотке, кА.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ ДЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ РЕЖИМОВ

Для расчётов сценариев квазистационарных плазменных режимов необходимо знать стационарные равновесные магнитные конфигурации плазменного шнуря при различных токах плазмы, которые обеспечиваются стационарными токами в полоидальных обмотках.

Расчёты стационарных магнитных конфигураций плазменного шнуря проводились с помощью кода PET [7] (рис. 5 и 6). Были рассчитаны равновесные конфигурации при токах плазмы (см. рис. 5,  $I_p = 2$  (a), 1,5 (b), 1,0 (c), 0,7 (d), 0,5 (e), 0,3 (e) и 0,25 MA (рис. 6.)). Для всех вариантов расчётов практически сохранены ге-



Параметр	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\zeta$	$\delta$	$\epsilon$
$R_0, \text{м}$	1,48	1,48				
$a_0, \text{м}$				1,48		
$I_{CSU}, \text{kA}$	-15,7	-13,2	-8,08	-3,96	-0,358	1,9
$I_{CS}, \text{kA}$	-25,6	-19,1	-12,8	-8,94	-6,41	-3,86
$I_{CSL}, \text{kA}$	-15,7	-13,5	-10	-8,24	-6,52	-4,48
$I_{PF1}, \text{kA}$	11,5	8,25	5,63	2,51	-0,319	-2,27
$I_{PF2}, \text{kA}$	-7,19	-4,23	-2,59	-0,94	0,14	0,984
$I_{PF3}, \text{kA}$	-6,49	-6,92	-5,45	-5,31	-4,87	-4,08
$I_{PF4}, \text{kA}$	-15,4	-9,45	-5,13	-2,09	-0,629	0,44
$I_{PF5}, \text{kA}$	-7,96	-8,75	-7,47	-7,2	-6,17	-4,64
$I_{PF6}, \text{kA}$	23,4	21,5	16,7	14,5	11,8	8,36
$I_p, \text{MA}$	2	1,5	1	0,7	0,5	0,3
$\beta_p$	0,467	0,469	0,469	0,468	0,469	0,471
$I_{(3)}$	0,8	0,8	0,801	0,8	0,799	0,8
$\kappa$	1,84	1,83	1,83	1,82	1,82	1,81
$\delta$	0,3	0,27	0,29	0,3	0,3	0,26
$A$			0,67		2,21	

Рис. 5. Равновесные магнитные конфигурации плазменного шнуря для токов 2—0,3 MA

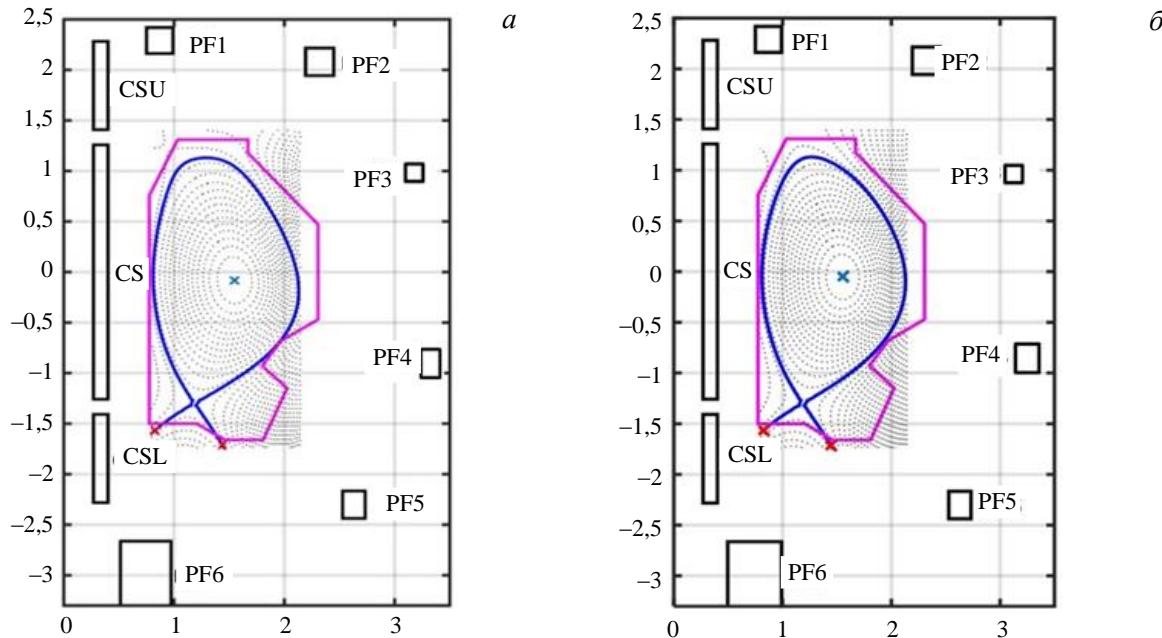


Рис. 6. Равновесные магнитные конфигурации плазменного шнуря для тока 250 кА: *а* — треугольность 0,27, длительность разряда 200 с; *б* — треугольность 0,31, шнур смещён на 2 см вверх, длительность разряда 400 с

Т а б л и ц а 3. Максимальное время протекания равновесного тока в полоидальных и тороидальной обмотках

Ток плазмы, МА	ОИ1	ОИ3	ОИ2	ОУ1	ОУ2	ОУ3	ОУ4	ОУ5	ОУ6	ОТП (ток /поле)
2	11,9	11,9	4,2	16,5	60	55	17,5	49	21	10,4 (20 кА/2 Тл)
1,5	17	16,5	7,7	33	190	49	49	40	25	19 (15 кА/1,5 Тл)
1,0	47,5	31	18	80	700	80	188	56	43	55 (10 кА/1,0 Тл)
0,7	280	47	37	Ст.	Ст.	86	Ст.	60	58	120 (7 кА/0,7 Тл)
0,5	Ст.	78	74	Ст.	Ст.	104	Ст.	85	92	250 (5 кА/0,5 Тл)
0,3	Ст.	194	210	Ст.	Ст.	160	Ст.	160	194	Ст. (3 кА/0,3 Тл)
0,25 (рис. 6, <i>а</i> )	Ст.	315	308	Ст.	Ст.	200	Ст.	230	280	Ст. (2,5 кА/0,25 Тл)
0,25 (рис. 6, <i>б</i> )	Ст.	733	406	Ст.	Ст.	600	Ст.	396	400	460 (4 кА/0,4 Тл)

ометрические параметры шнуря, такие как аспектное отношение ( $A = 2,21$ ), вытянутость ( $\kappa_{95} = 1,81—1,84$ ) и треугольность ( $\delta_{95} = 0,27—0,31$ ), а также внутренняя индуктивность ( $I_i = 0,8$ ) и запас устойчивости плазменного шнуря ( $q_{95} \approx 4,5$ ), т.е. величина тороидального магнитного поля синхронно снижалась с током плазмы. Во всех полоидальных обмотках были определены равновесные токи, которые позволили определить длительность разрядов при данном токе плазмы. В табл. 3 представлены рассчитанные значения максимального времени протекания токов в обмотках для режимов с токами плазмы в диапазоне 2—0,25 МА. Надпись «Ст.» означает, что для данного тока плазмы согласно расчётом, представленным на рис. 5, ток в обмотке может протекать стационарно, т.е. перегрев проводника не превысит 60 °С. Согласно проведённым расчётом длительность разряда при поддержании тока неиндукционным способом составит примерно 4 с для тока 2 МА, примерно 8 с для тока 1,5 МА, около 20 с для тока 1 МА, около 40 с для тока 0,7 МА, примерно 80 с для тока 0,5 МА, более 100 с для тока 0,4 МА, 160 с для тока 0,3 МА и для тока 250 кА от 200 с (см. рис. 6, *а*) до 400 с (см. рис. 6, *б*). Как видно на рис. 6, при проведении плазменных режимов, в которых равновесные магнитные конфигурации обеспечиваются токами в полоидальных обмотках величиной менее 4 кА, небольшие вариации геометрии плазменного шнуря, а следовательно, и токов в обмотках приводят к существенным изменениям длительности разряда.

### СЦЕНАРИИ РАЗРЯДА С ТОКАМИ 0,25 И 0,5 МА

Как видно из табл. 3, плазменные режимы с токами до 500 кА могут быть получены при величине тороидального поля 0,4—0,5 Тл, при этом длительность разряда с током плазмы 250 кА ( $B_t = 0,4$  Тл) может составить 400 с, а с током плазмы 500 кА ( $B_t = 0,5$  Тл) порядка 80 с.

Моделирование эволюции параметров плазменного шнуря для таких разрядов проводилось с использованием транспортного кода АСТРА [8]. Расчётная модель и результаты расчётов для сценария с токами плазмы 1,0—2,0 МА при величине тороидального магнитного поля 1,5—2,0 Тл подробно изложены в работе [9]. На рис. 7, 8 представлены результаты расчётов распределений по малому радиусу тора основных параметров плазмы для квазистационарной стадии разрядов с током 0,5 и 0,25 МА при величине тороидального магнитного поля 0,5 Тл. Параметры разрядов подобраны таким образом, чтобы осуществлялся полностью неиндукционный токоперенос. Предполагалось, что при инжекции используются пучки быстрых атомов водорода с основной энергией 40 кэВ и с экспериментальным распределением по энергиям компонентов пучка. Для полностью неиндуктивного поддержания тока при полном токе плазмы 0,5 МА требуется мощность инжекции 3,8 МВт при средней плотности плазмы  $\sim 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Такая плотность составляет 0,64 от критической плотности Гринвальда. При токе плазмы 0,25 МА требуется мощность инжекции 2,6 МВт при средней плотности основной плазмы  $\sim 1,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , что составляет  $\sim 0,77$  от предела Гринвальда, и дальнейшее увеличение плотности плазмы нецелесообразно из-за увеличения опасности возникновения МГД-неустойчивостей. Уменьшение плотности основной плазмы хотя и увеличивает эффективность генерации тока, но ухудшает захват инжектируемых пучков. Поэтому дальнейшее уменьшение плотности плазмы также нецелесообразно.

Как видно на рисунках, полный ток плазмы состоит из тока, генерируемого инжектируемым пучком, и бутстреп-тока. Для разряда с током 0,5 МА доля пучкового тока составляет 37% и доля бутстреп-тока 63% полного тока. Для разряда с током плазмы 0,25 МА доля пучкового тока  $\sim 46\%$  и бутстреп-тока  $\sim 54\%$ .

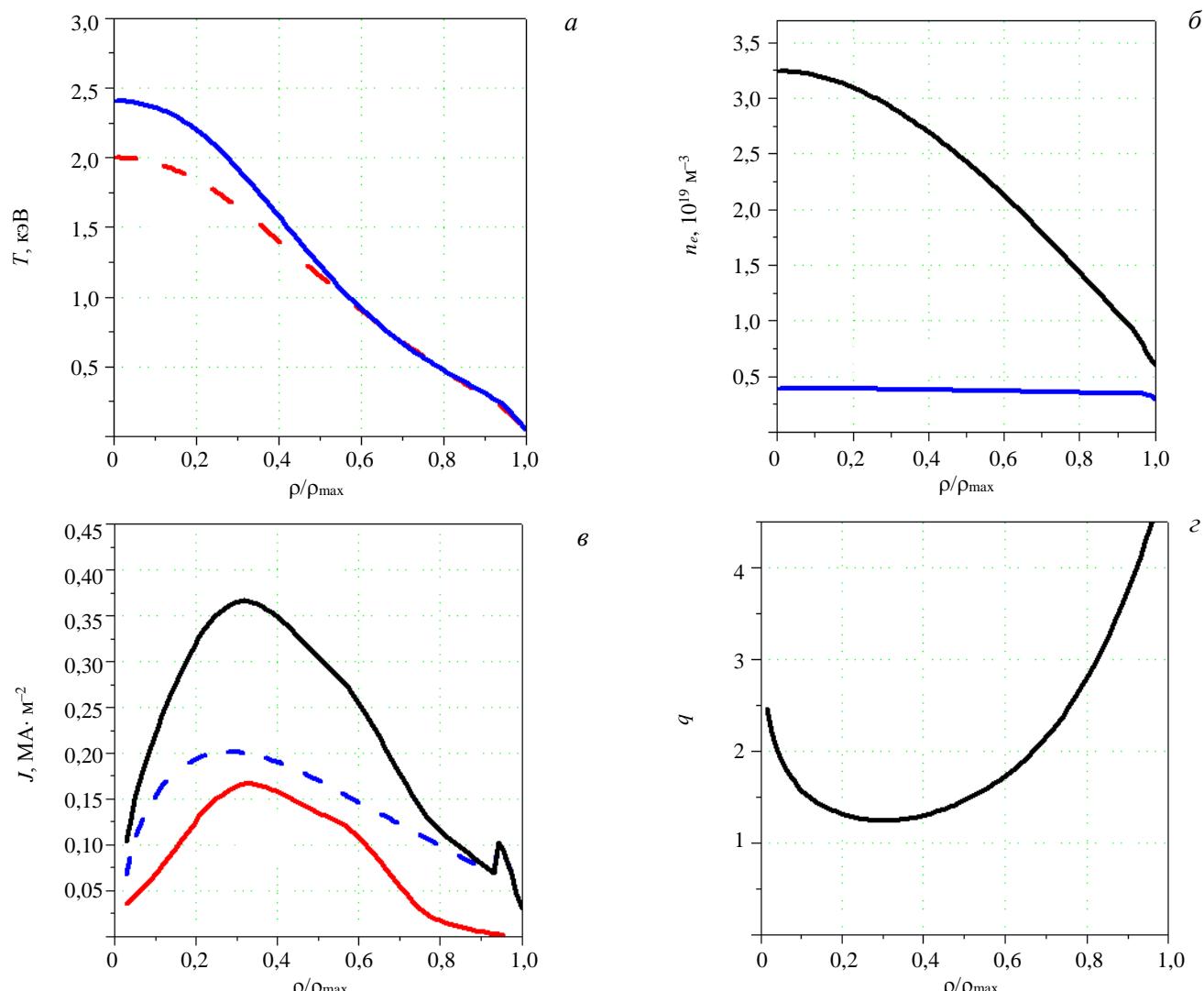


Рис. 7. Распределение по малому радиусу основных параметров разряда Т-15МД с током плазмы 0,5 МА:  $T_e$  (—) и  $T_i$  (—) — температура электронов и ионов соответственно (а);  $n_e$  (—) — концентрация электронов;  $n_{Li^+}$  (—) — концентрация лития (б);  $J_{tot}$  (—) — полная плотность тока;  $J_{bs}$  (—) — плотность бутстреп-тока;  $J_{NBI}$  (—) — плотность тока пучка (в);  $q$  — величина запаса устойчивости (г)

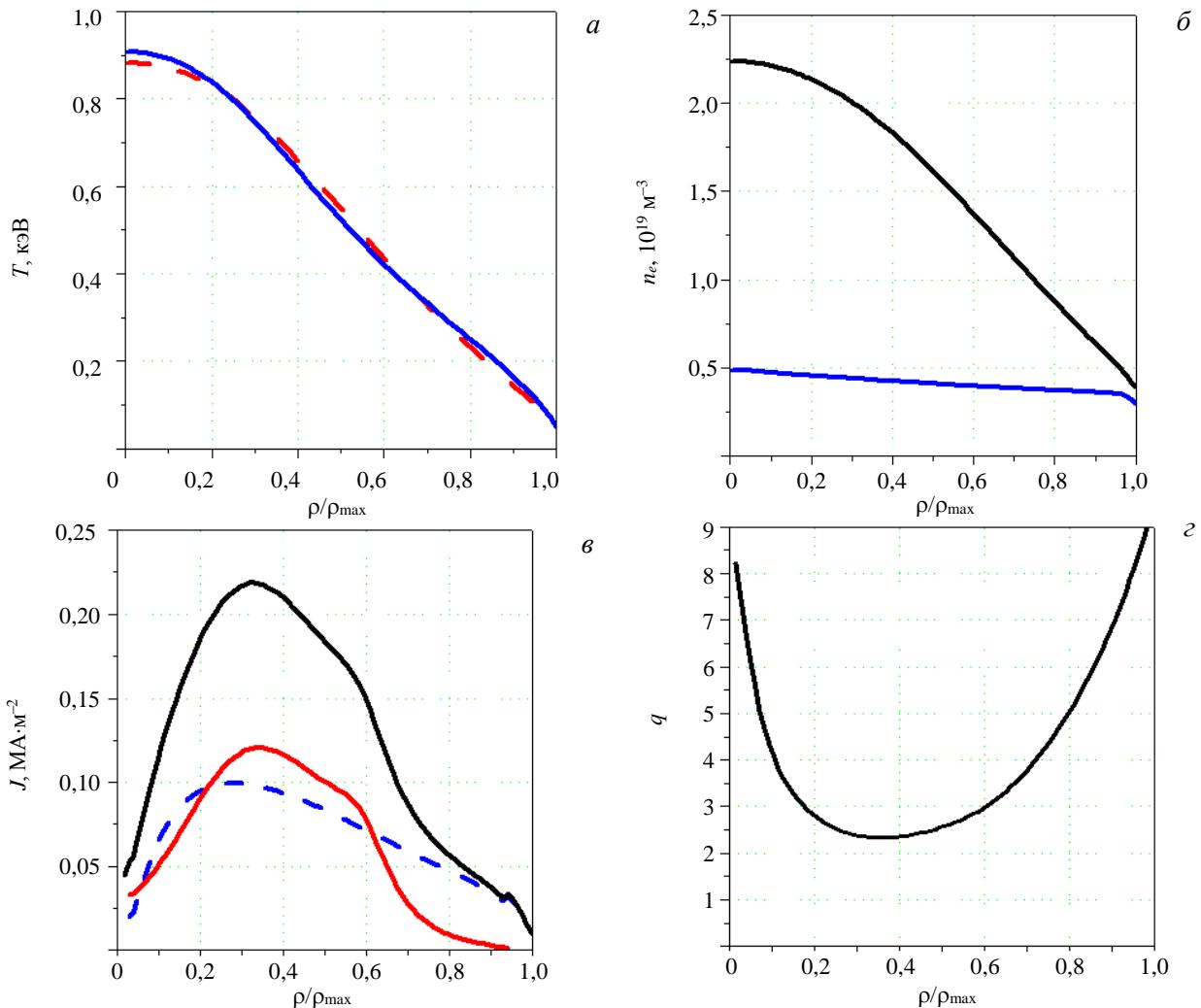


Рис. 8. Распределение по малому радиусу основных параметров разряда Т-15МД с током плазмы 0,25 МА (обозначения как на рис. 7)

В центральных областях плазмы имеется довольно широкая зона с отрицательным магнитным широм. Поскольку в разрядах с отрицательным широм в эксперименте наблюдается улучшенное удержание плазмы по сравнению со скейлингом Н-моды [10], использовался коэффициент улучшения удержания НН  $\sim 1,2$ — $1,3$ .

В качестве основной примеси рассматривался литий, так как в Т-15МД он рассматривается как возможный материал стенки и пластины дивертора. Для моделирования излучения и динамики лития использовался код ZIMPUR [11]. Концентрация Li составляла 4—6% от концентрации электронов. Эффективный заряд при этом был равен  $\sim 1,25$ — $1,35$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых расчётов были определены уровни уставок в схеме защит и блокировок системы электропитания токамака Т-15МД для обеспечения её безаварийной работы. Эти уставки по величинам токов и длительности их протекания в тороидальной и полоидальных обмотках воспрепятствуют нагреву обмоток больше, чем на 60 °С. Аналитические зависимости максимального времени протекания токов в обмотках, обеспечивающих равновесные магнитные конфигурации, будут использованы в системах защит и управления плазменным разрядом в режиме on-line, а также при планировании сценариев разряда. Расчёты равновесных плазменных конфигураций в диапазоне токов 0,25—2,0 МА с определением величин токов в полоидальных обмотках проводились с помощью кода PET и позволили определить возможную длительность квазистационарных плазменных разрядов. Так, при величине тороидального поля 0,4 Тл можно получить разряд с током плазмы 250 кА и длительностью 400 с. Увеличение длительности разрядов может быть осуществлено при незначительной вариации токов в полоидальных обмотках за счёт изменения геометрии плазменного шнуря (вытянутости, треугольности, малого радиуса). Моделирование эволюции параметров плазменного шнуря для разрядов с токами плазмы

250 и 500 кА проводилось с использованием транспортного кода АСТРА и кода ZIMPUR. Расчёты показали, что для полностью неиндуктивного поддержания полного тока 0,5 МА требуется мощность инжекции быстрых атомов 3,8 МВт при средней плотности плазмы  $\sim 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

Авторы выражают благодарность А.А. Вороновой за предоставленный в 3D-формате вид токамака Т-15МД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wan B.N., Liang Y., Gong X.Z. et al. Recent advances in EAST physics experiments in support of steady-state operation for ITER and CFETR. — Nuclear Fusion, 2019, vol. 59, № 11, p. 112003.
2. Park H.K., In Y., Choi M.J., Hong S.H. et al. Overview of KSTAR research progress and future plans toward ITER and K-DEMO. — Nuclear Fusion, 2019, vol. 59, № 11, p. 112020.
3. Khvostenko P.P., Azizov E.A., Alfimov D.E. et al. The magnet system of the Tokamak T-15 upgrade. — Fusion Engineering and Design, 2015, vol. 98—99, p. 1090—1093.
4. Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н. и др. Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15—38.
5. Chudnovsky A.N., Khvostenko P.P., Posadsky I.A. Determination of settings in the protection system for tokamak-15 superconducting magnet (SM). — IEEE Transaction on Magnetics, 1996, vol. 32, № 4, p. 3117—3120.
6. Bondarchuk E.N., Dnistrovskij Yu.N., Leonov V.M. et al. Vertical MHD stability of the T-15M tokamak plasma. — Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11, № 4, p. 219—227.
7. Galkin S.A., Ivanov A.A., Medvedev S.Yu., Poshekhanov Yu.Yu. Comparison of tokamak axisymmetric mode growth rates from linear MHD and equilibrium evolution approaches. — Nuclear Fusion, 1997, vol. 37, № 10, p. 1455.
8. Pereverzev G.V., Yushmanov P.N. ASTRA Automated System for Transport Analysis in a Tokamak: Preprint IPP 5/98. Garching, Germany, 2002.
9. Леонов В.М. Исследование условий получения квазистационарных режимов в токамаке Т-15МД. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 3, с. 73—79.
10. ITER Physics basic, chapter 2. — Nucl. Fusion, 1999, vol. 39, p. 2175.
11. Leonov V.M., Zhogolev V.E. Simulation of high-Z impurity behavior for ITER operational scenarios using the ZIMPUR impurity code. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2005, vol. 47, p. 903.



Петр Павлович Хвостенко, научный руководитель, д. техн. н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова, Заслуженный работник атомной промышленности Российской Федерации; ККТЭиПТ НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

[Khvostenko\\_PP@nrcki.ru](mailto:Khvostenko_PP@nrcki.ru)



Эдуард Николаевич Бондарчук, начальник отдела, к. техн. н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; АО «НИИЭФА» им. Д.В. Ефремова, 196641 Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на металлострой 3, Россия  
[bondar@sintez.niiefa.spb.su](mailto:bondar@sintez.niiefa.spb.su)



Андрей Александрович Кавин, начальник лаборатории, к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности; АО «НИИЭФА» им. Д.В. Ефремова, 196641 Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на металло-строй 3, Россия



Владимир Михайлович Леонов, в.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
[Leonov\\_VM@nrcki.ru](mailto:Leonov_VM@nrcki.ru)



Александр Николаевич  
Чудновский, начальник  
лаборатории, к.ф.-м.н., ве-  
теран атомной энергетики и  
промышленности, лауреат  
премии им. И.В. Курчатова;  
НИЦ «Курчатовский инсти-  
тут», 123182, Москва, пл.  
Академика Курчатова 1,  
Россия  
Chudnovskiy\_AN@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 12 июня 2020 г.

После доработки 15 июня 2020 г.

Принята к публикации 5 августа 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 60—70.