

НИИЭФА - П-Б -- 850 .

НИИЭФА П-Б-0850

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ им. Д.В.ЕФРЕМОВА**

А.М.Астапкович, В.М.Комаров,
С.Н.Садаков, В.В.Филатов

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПРОЦЕССОВ ПРИ СРЫВЕ ТОКА
ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ИТЭР**

П р е п р и н т

**МОСКВА
ЦНИАТОМИНФОРМ
1990**

Астанкович А.М., Комаров В.М., Садаков С.Н., Филатов В.В.
Результаты численного исследования переходных электромагнитных процессов при срыве тока плазмы в установке ИТЭР: Препринт Б-0850. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1990, 17 с., с ил., цена 13 к.

Описываются сценарий срыва тока плазмы в установке ИТЭР и расчетная схема с учетом конструктивных элементов внутри вакуумной камеры.

Приводятся результаты расчетов вихревых токов, электродинамических нагрузок и скорости изменения поперечного поля для камеры, blankets, дивертора и других элементов конструкции при срыве тока плазмы.

Проанализирована зависимость полученных результатов от степени секционирования blankets, а также от величины электросопротивления резистивных вставок камеры и переходного сопротивления контакта модулей blankets.

О Г Л А В Л Е Н И Е

В в е д е н и е	I
1. Сценарий срыва тока плазмы	I
2. Расчетная схема для анализа срыва тока плазмы.	2
3. Основные результаты анализа срыва тока плазмы	3
В и в о д ы	15
Список литературы	17

© Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИАтоминформ), 1990 г.

В В Е Д Е Н И Е

Численное исследование переходных электромагнитных процессов в установке ИТЭР /1/ было выполнено с помощью вычислительной программы EDDYC -2 /2, 3/, позволяющей провести двухмерное описание положения и формы поперечного сечения МГД-равновесного подвижного плазменного шнура при срыве тока плазмы. Текущее распределение плотности тороидального плазменного тока j_{pe} принималось в функциональной зависимости от суммарного полоидального потока:

$$j_{pe} = j_0 \left[\alpha \frac{z}{z_m} - (1-\alpha) \frac{z_m}{z} \right] \left[1 - \left(\frac{\psi_m - \psi}{\psi_m - \psi_B} \right)^c \right], \quad (1)$$

где ψ_B, ψ_m - магнитные потоки на границе и магнитной оси плазмы;
 α, c - параметры, связанные соответственно с полоидальной бета и степенью пинирования плотности тока.

Для стационарного состояния плазмы принято $\alpha(0) = 1, c(0) = 3$.

1. СЦЕНАРИЙ СРЫВА ТОКА ПЛАЗМЫ

Для базового сценария динамической модели срыва в численном анализе рассматривались следующие фазы поведения тока плазмы

I_{pe} :

1) в первоначальной фазе теплового срыва длительностью $\tau_1 = 0,2$ мс при перераспределении профиля j_{pe} общий ток плазмы увеличивается на 10+12% по сравнению с его стационарным значением $I_{pe}(0) = 22$ МА;

2) в последующей фазе при средней скорости убывания тока плазмы 1 МА/мс движение МГД-равновесного плазменного шнура происходит по двум степеням свободы и заканчивается на первой стенке внутреннего blankets к моменту $\tau_2 = 22$ мс при незначительном (0,1 - 0,15 м) вертикальном смещении относительно стационарного положения.

Характер движения и величина полного смещения являются результатами численного моделирования.

Уровень активного электрического напряжения на обходе плазменного шнура при срыве принимался постоянным и составлял -3,45 кВ. Начальные токи катушек полоидальной системы (рис.1), МА:

$$\begin{aligned} I_1(0) &= -20,3; & I_2(0) &= -22,4; & I_3(0) &= -13,5; \\ I_4(0) &= -5,7; & I_5(0) &= 10,6; & I_6(0) &= -8,25; \\ I_7(0) &= -5,3. \end{aligned}$$

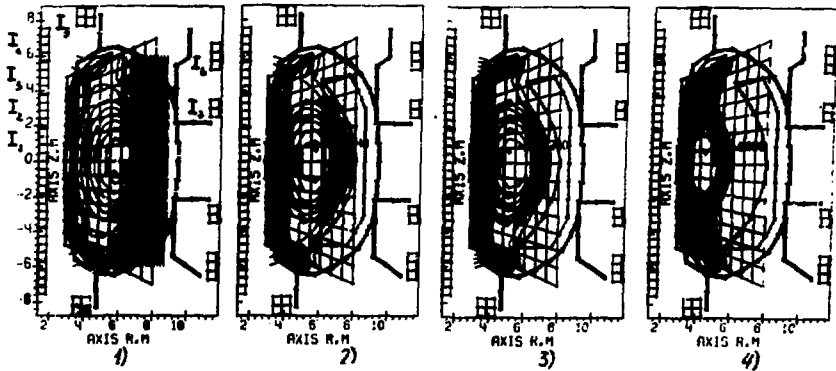


Рис.1. Расчетная конфигурация вакуумной камеры, blankets, дивертора, обмотки полоидальных полей и эволюция плазменного шнура для $R_{v0} = 20$ мкОм, $N_{01} = 32$, $R_c = 1$ МОм: 1 - $t = 0$; 2 - $t = 10$ мс; 3 - $t = 15$ мс; 4 - $t = 20$ мс

2. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА СРЫВА ТОКА ПЛАЗМЫ

Расчетная геометрия катушек полоидальной системы ОПШ, конструктивных элементов корпуса вакуумной камеры, патрубков, blankets, диверторных приемных элементов, а также равновесное стационарное положение плазменного шнура ($t = 0$) представлены на рис.1. В расчетной схеме использовались следующие конструктивные параметры установки:

1) секционирование конструктивных элементов:

- вакуумная камера 16,
- blanket 16, 32, 48,
- дивертор: а) широкая пластина 48,
- б) трубка 1120;

2) суммарное активное сопротивление, МОм:

- секторов вакуумной камеры в тороидальном направлении 0,0018,
- одного витка пассивной стабилизации 0,14,

- резистивных вставок:

а) вакуумной камеры	0,02 (0,04),
б) бланкета	0,02; 0,1; 1; 10,
в) дивертора	0,02; 0,1; 1; 10;

Вклад начинки бланкета и радиационной защиты в активное сопротивление бланкета не учитывался;

3) толщина стенок, см:

		удельное электросопротивление, Ом.м:
- вакуумной камеры	40,	$0,7 \cdot 10^{-6}$,
- бланкета (защиты на наружном бланкете)	2,5 (42,5),	$0,7 \cdot 10^{-6}$,
- пассивных витков	0,8,	$2 \cdot 10^{-8}$,
- дивертора	2,5	$2 \cdot 10^{-8}$.

Расчетное сечение бланкета и пассивных витков приведено на Рис.2.

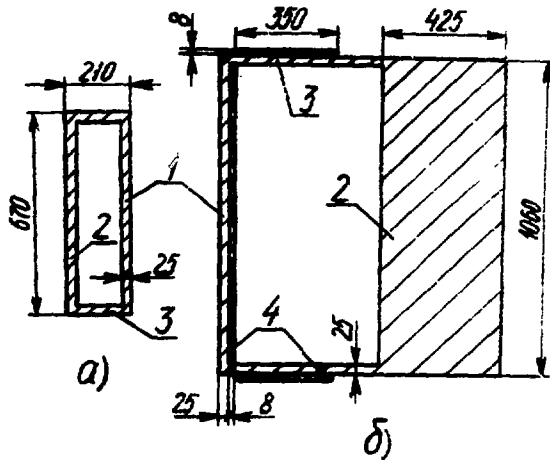


Рис.2. Расчетное сечение бланкета плоскостью $Z = 0$:
 а - внутренний бланкет ($N_{blz} = 32$); б - внешний бланкет ($N_{blo} = 48$); 1 - первая стенка;
 2 - задняя стенка и защита; 3 - торцевые стенки;
 4 - пластины пассивной стабилизации

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СРЫВА ТОКА ПЛАЗМЫ

Анализ срыва проводился при варьировании следующих параметров:

- секционирования бланкета $N_{bl} = 16, 32, 48$;
- суммарного сопротивления резистивных вставок вакуумной камеры $R_{vB} = 20; 40$ мкОм;

- суммарного переходного сопротивления контактирующих пар бланкет-бланкет, дивертор-дивертор

$$R_c = 0,02; 0,1; 1; 10 \text{ МОм.}$$

Характер движения плазменного шнура (рис.1), а также изменения тока плазмы I_{pl} и суммарного тороидального тока в корпусе вакуумной камеры I_{vv} (табл.1, рис.3) слабо зависит от величины N_{bl} . При этом максимум тока I_{vv} (22 мс) = 20 МА наблюдается для $N_{bl} = 32$, $R_{vb} = 20 \text{ мкОм}$, $R_c = 1 \text{ МОм}$, а снижение I_{pl} носит практически линейный характер.

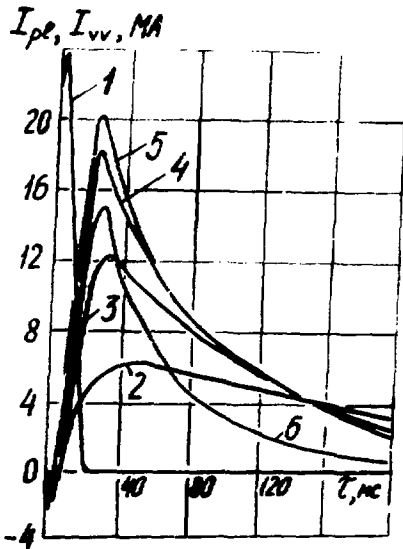


Рис.3. Изменение во времени полного тороидального тока плазмы I_{pl} (кривая 1) и тороидального тока в корпусе камеры I_{vv} : $N_{bl} = 32$;
 2,3,4,5 - $R_{vb} = 20 \text{ мкОм}$;
 6 - $R_{vb} = 40 \text{ мкОм}$;
 2 - $R_c = 0,02 \text{ МОм}$; 3 - $R_c = 0,1 \text{ МОм}$; 4,6 - $R_c = 1 \text{ МОм}$;
 5 - $R_c = 10 \text{ МОм}$

Распределение электродинамического давления от взаимодействия вихревых токов с магнитным полем на стенках верхней части внутреннего (I) бланкета схематично показано на рис.4.

Давление $p(B_p)$ от взаимодействия продольного вихревого тока с поперечным полем B_p постоянно в тороидальном направлении, а по высоте имеет при $z = 0$ максимальные значения, которые составляют (МПа):

- внутренний бланкет: а) первая стенка 0,6 - 1,2;
- б) задняя стенка 1;
- внешний бланкет: а) первая стенка 0,8;
- б) задняя стенка 0,6.

Таблица I. Изменение во времени полного тороидального тока в корпусе вакуумной камеры I_{VV} (МА).

$$N_{BL} = 32, I_{pe}(0) = 22 \text{ МА}$$

$t, \text{ мс}$	0,2	5	10	15	20	22	25	30	40	100	200
$R_{VB} = 20 \text{ мкОм}$ $R_c = 20 \text{ мкОм}$	-1,7	-1,4	0,2	1,9	4,8	5,1	5,4	5,8	6,2	5,1	3
$R_{VB} = 20 \text{ мкОм}$ $R_c = 0,1 \text{ МОм}$	-1,6	1,8	5,8	9,6	13,2	15,2	15,2	13,4	10,6	3	0,6
$R_{VB} = 20 \text{ мкОм}$ $R_c = 1 \text{ МОм}$	-2,0	2,4	7,8	12,4	17,2	20,0	19,4	18,0	15,6	7	2,2
$R_{VB} = 40 \text{ мкОм}$ $R_c = 1 \text{ МОм}$	-1,6	1,6	6,6	11,2	15,6	18,2	18,1	17,0	15,0	7,2	2,4

с:

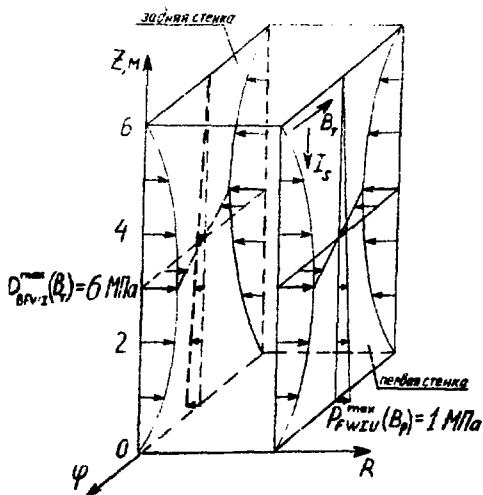


Рис.4. Распределение давления от полоидального поля B_p и торoidalного поля B_T на верхней части внутреннего blankets

и задней (BW) стенок blankets и однородного распределения плотности поперечного вихревого тока в них распределение давления $p(B_T)$ на этих стенках одинаково.

Аналогичный характер носит распределение давлений на стенки внешнего (O) blankets. Для внешнего blankets наибольшее давление $p(B_T)$ составляет при этом $0,1 - 0,18$ МПа. Дополнительно первая стенка blankets воспринимает нагрузки, обусловленные давлением $0,06 - 0,08$ МПа на графитовые защитные пластины, размеры которых $15 \times 15 \times 2$ см, а удельное электросопротивление $8 \cdot 10^{-8}$ Ом.м.

Равнодействующими давлений $p(B_T)$ для четвертой модулей blankets являются суммарные силы F_R и F_z , типичные направления которых в конце срыва показаны на рис.5. Направления радиальных компонент F_R противоположны для верхней (U) и нижней (L) частей модуля blankets, а осевых компонент F_z - одинаковы, при этом абсолютные значения сил и давлений для таких частей практически совпадают (разница не превышает 8% на всем протяжении срыва).

Наибольшее давление $p(B_p)$ на внутреннюю стенку вакуумной камеры достигает 1 МПа, а на диверторные пластины - 0,23 МПа.

Доминирующую величину имеет давление $p(B_T)$ от взаимодействия поперечного вихревого тока с торoidalным магнитным полем $B_T(r)$ установки. По высоте blankets $p(B_T)$ распределено примерно синусоидально и симметрично относительно $Z = 0$, а в торoidalном направлении линейно меняется от $-P_{max}$ до $+P_{max}$. Вследствие одинаковых толщин первой (FW)

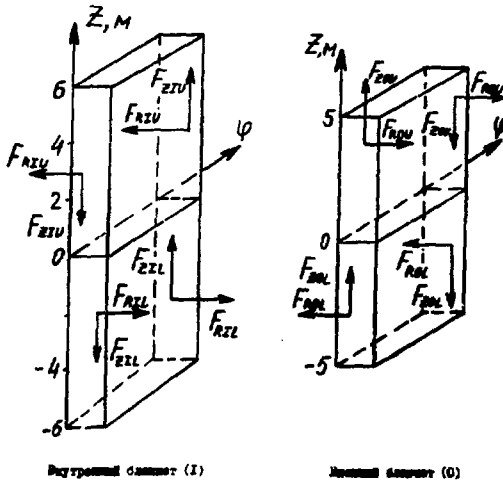


Рис.5. Характер распределения суммарных сил от торoidalного поля, действующих на четверти модулей внутреннего и внешнего blankets

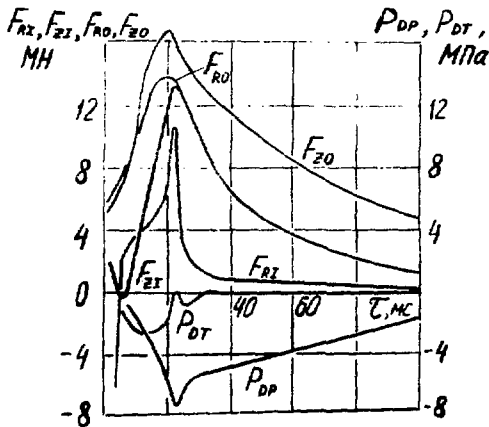


Рис.6. Изменение во времени давлений на дивертор P_{DP} , P_{DT} и сил на четверть модуля blankets F_{Rz} , F_{zz} , F_{Ro} , F_{zo} от торoidalного поля

шесть раз в зависимости от параметров конструкции. Уровень нагрузок на blankets и дивертор $P(B_T)$ в конце срыва при $t = \tau_2 = 22$ мс, а на диверторные пластины при $t = 18$ мс для различных вариантов представлен в табл.5.

Значения этих сил, а также давлений $P(B_T)$ на кромках диверторных пластин P_{DP} или трубок P_{DT} для $N_{BL} = 32$, $R_{VB} = 20$ мОм, $R_C = 1$ мОм/10 мОм в различные моменты времени приведены в табл.2, а их графики для $R_C = 1$ мОм - на рис.6. В случае $N_{BL} = 48$ нагрузки на внешний blanket несколько ниже приведенных.

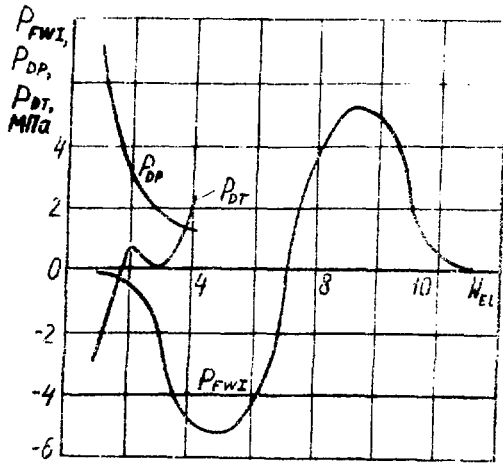
Распределение давления $P(B_T)$ по периметру первой стенки внутреннего blankets и дивертора для $N_{BL} = 32$, $R_{VB} = 20$ мОм, $R_C = 1$ мОм в конце срыва ($t = \tau_2 = 22$ мс) показано на рис.7 как функция номера элемента N_{EL} , а для $R_C = 0,1$ мОм/10 мОм в табл.3 приведено распределение погонной силы, приходящейся на половину ширины модуля.

Нагрузки на blankets для этих вариантов в моменты достижения наибольших значений приведены в табл.4.

Максимум давления $P(B_T)$ превосходит максимум давления $P(B_p)$ в два -

Таблица 2. Радиальные и осевые компоненты сил на четверть модуля blankets. $R_{Vg} = 20 \text{ мкОм}$,
 $N_{BL} = 32$, $R_c = 1 \text{ МОм}/10 \text{ МОм}$; давление на дивертор $R_c = 1 \text{ МОм}$

t , мс	5	10	15	20	22	25	30	40	100
F_{RI} , МН	$\frac{2.4}{1.6}$	$\frac{3.9}{3.3}$	$\frac{4.5}{4.1}$	$\frac{6.9}{6.5}$	$\frac{10.6}{12.8}$	$\frac{2.3}{2.7}$	$\frac{1.1}{1.1}$	$\frac{0.6}{0.6}$	$\frac{0.1}{0.2}$
F_{ZI} , МН	$\frac{-0.3}{0}$	$\frac{3.9}{4.3}$	$\frac{7.2}{7.8}$	$\frac{10.5}{11}$	$\frac{13.3}{13.6}$	$\frac{12.3}{12.7}$	$\frac{9.9}{9.9}$	$\frac{6.4}{6.2}$	$\frac{1.1}{0.9}$
F_{RC} , МН	$\frac{7.4}{7.5}$	$\frac{11.3}{11.2}$	$\frac{13.2}{13.1}$	$\frac{14.0}{13.9}$	$\frac{13.6}{13.5}$	$\frac{12.1}{12}$	$\frac{9.6}{9.7}$	$\frac{3.6}{6.5}$	$\frac{0.9}{1.3}$
F_{ZC} , МН	$\frac{7}{6.7}$	$\frac{11.8}{11.4}$	$\frac{14.8}{14.5}$	$\frac{16.7}{16.5}$	$\frac{16.8}{16.7}$	$\frac{15.4}{15.4}$	$\frac{13.8}{13.8}$	$\frac{11.3}{11.3}$	$\frac{4.7}{4.6}$
ρ_{DP} , МПа	0	-1,8	-3,5	-5,8	-7,2	-5,6	-5,1	-4,8	-1,6
ρ_{DT} , МПа	-1	-2.4	-2,4	-1,4	-0,1	-0,3	-0,1	-	-



N_{EL}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R, M	4,4	3,7	3,4	3,3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,9	3,9	3,4	3,7	4,4
Z, M	-5,7	-4,9	-4,0	-3,0	-2,0	-1,0	0	1,0	2,0	3,0	4,0	4,9	5,7

N_{EL}	1	2	3	4
R, M	4,1	4,3	4,5	4,3
Z, M	4,3	4,8	5,3	5,7

Рис.7. Эпюра давления от тороидального поля на первую стенку внутреннего blankets P_{FWI} (22 мс) и дивертор P_{DP} (22 мс), P_{DT} (13 мс)

В табл.6 и на рис.8 приведены временные зависимости скорости изменения полоидального поля на витках ОТИ (внутренняя нога), соленоиде (с), витке ОПИ (катушка 5), криостате (CR) и несущей структуре ОТИ (STR). При этом изменение полоидального поля на внутреннем обводе тороидальной катушки ($r = 2,6$ м; $Z = 0$) ΔB_z за 200 мс составляет 1,2 – 2 Тл, а среднее значение полоидального магнитного поля на ОПИ5, криостате и несущей структуре ОТИ составляет соответственно 3,6; 0,3 и 2,6 Тл.

Определены также интегральные параметры, характеризующие воздействие изменений полоидального магнитного поля на сверхпроводник ОТИ на внутреннем обводе катушки:

$$J_1 = \int_{\tau}^{\phi} \int_{\ell} \dot{B}_n^2 d\ell d\tau, \quad ,$$

$$J_2 = \int_{\tau}^{\phi} \int_{\ell} \dot{B}_t^2 d\ell d\tau$$

Таблица 3. Распределение по периметру blankets погонной силы F_R, F_Z (НН/м) в конце срыва

N_{EL}	R м	Z м	$K_c = 0,1$ мом		$K_c = 10$ мом	
			F_R	F_Z	F_R	F_Z
I	4,4	-5,7	-0,2	0	0	0,33
2	3,7	-4,9	-0,88	-0,15	-0,52	0,28
3	3,4	-4,0	-3,02	-0,31	-1,86	0,22
4	3,3	-3,0	-4,66	1,38	-3,75	1,75
5	3,3	-2,0	-4,19	3,41	-3,92	3,33
6	3,2	-1,0	-3,13	3,41	-2,92	3,36
7	3,2	0,0	-0,18	4,41	-0,17	4,25
8	3,2	1,0	2,82	4,31	2,64	4,16
9	3,3	2,0	4,05	3,41	3,85	3,38
10	3,3	3,0	4,7	3,32	3,86	3,3
11	3,4	4,0	3,08	1,21	1,94	1,68
12	3,7	4,9	0,91	-0,33	0,55	0,21
13	4,4	5,7	0,19	0,31	0	0,87
14	6,1	5,4	0,02	0,05	0,05	0,11
15	7,5	4,6	0,8	0,8	0,64	-0,88
16	8,1	4,0	3,39	2,32	3,3	1,08
17	8,4	3,0	3,81	3,77	3,93	4,15
18	8,5	2,0	3,07	4,08	3,44	4,66
19	8,5	1,0	1,87	4,03	2,14	3,67
20	8,5	0,0	0,01	4,39	0,02	4,02
21	8,5	-1,0	-1,85	4,39	-2,09	4,01
22	8,5	-2,0	-3,05	4,03	-3,4	3,67
23	8,4	-3,0	-3,78	4,97	-3,9	4,64
24	8,1	-3,9	-3,23	4,64	-3,1	4,24
25	7,5	-4,6	-0,89	2,13	-0,7	1,08
26	6,0	-5,4	0	-0,73	-0,02	-1,21

Таблица 4. Максимальные значения суммарных сил (МН) и давления (МПа), действующих на модули blankets при срыве тока плазмы, для различных значений R_c

R_c МОМ	F_{FTU}	F_{FTL}	F_{ZTU}	F_{ZTL}	F_{FTOU}	F_{FTOL}	F_{ZTOU}	F_{ZTOL}	P_{FVUL} (B_T)	P_{FWOI} (B_T)	P_{BWL} (B_T)	P_{FVUL} (B_F)	P_{BWL} (B_F)	P_{FWOU} (B_F)	P_{BWL} (B_F)
0,1	15,7	-16,3	12,3	12,2	13	-12,8	19,5	19,5	-7,1	-1,8	-3,2	0,7	-0,9	0,8	0,4
10	12,8	-13,2	13,6	13,6	13,5	-13,3	16,7	16,4	-6,1	-1,8	-3,2	0,6	-1	0,8	0,6

Таблица 5. Нагрузки на бланкет и дивертор от тороидального поля и изменения полей и токов в момент времени $t = \tau_2 = 22$ мс

N_{BL}	16			32				48		
R_{VB} мКОМ	20			20		40	20			
R_c , МОМ	0,1	1	10	0,1	1	10	1	0,1	1	10
F_{RI} , МН	11,3	17,5	22	4,7	10,6	12,8	11,0	2,7	6,9	9,3
F_{ZI} , МН	11,8	12,1	12,1	12,9	13,3	13,6	13,5	13,1	13,5	13
F_{RO} , МН	15,4	16,6	16,2	12,5	13,6	13,6	13,4	10,4	11,3	11,3
F_{ZO} , МН	19,4	18,2	17,3	18,5	16,8	16,7	16,6	18,2	16,0	16,1
ρ_{FWI} , МПа	2,7	4,0	4,9	2,3	5,2	5,9	5,6	1,9	5,3	7,1
ρ_{DP} , МПа	9,6	7,1	5,7	9,1	7,2	5,8	7,5	8,8	7,1	5,9
ρ_{DT} , МПа	2,1	2,9	3,4	2,3	2,9	3,4	2,5	2,1	2,8	3,3
$\dot{B}_{Z\text{отн}}$, Тл/с	-66	-79	-82	—	-82	-88	-102	—	-87	-92
J_2 , Тл ² .м/с	340	429	435	356	435	446	593	353	435	451
\dot{B}_{Zc} , Тл/с	42	48	52	—	49	53	76	—	51	53
$\dot{B}_{Z\text{oms}}$, Тл/с	9,1	12,9	15,9	10,9	13,1	16,1	24	11,4	13,1	16,0
ΔI_5 , МА	1,09	1,33	1,36	1,09	1,33	1,36	1,49	1,09	1,33	1,38

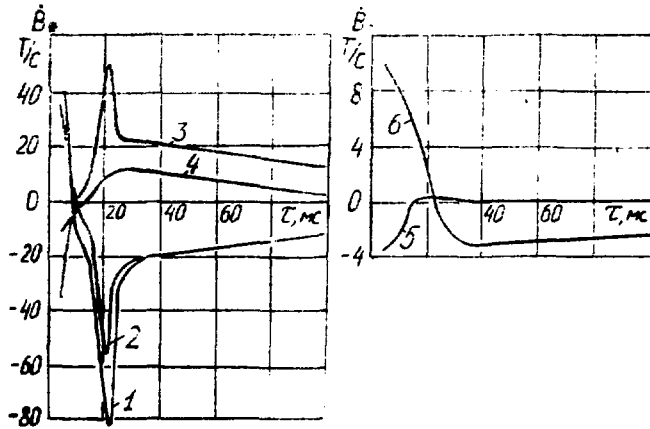


Рис.8. Временная зависимость скорости изменения пологдального поля для $N_{\text{ВЛ}} = 32$; $R_c = 1 \text{ МОм}$; $R_{\text{ВВ}} = 20 \text{ мКОм}$: 1 - \dot{B}_z на ОШ, $\tau = 2,6 \text{ м}$, $z = 0 \text{ м}$; 2 - $\tau = 2,2 \text{ м}$; 3 - \dot{B}_z на соленоиде, $\tau = 1,82$, $z = 0,91 \text{ м}$; 4 - \dot{B}_z на ОШ5, $\tau = 4,4 \text{ м}$; $z = 7,95 \text{ м}$; 5 - \dot{B}_n на криостате, $\tau = 1,1 \text{ м}$, $z = 10,7 \text{ м}$; 6 - \dot{B}_n на несущей структуре ОШ, $\tau = 11,16 \text{ м}$; $z = 2,5 \text{ м}$

Значения J_2 представлены в табл.5, а значение J_1 во всех вариантах расчета не превышают $25 \text{ Тл}^2 \cdot \text{м/с}$. В табл.5 приведены также наибольшие скорости изменения поля $\dot{B}_z \text{ отп}$, $\dot{B}_z \text{ с}$, $\dot{B}_z \text{ отп5}$ (достигаются в интервале $t = 20-30 \text{ мс}$) и наброс тока в катушке № 5 ОШ ΔI_5 к моменту времени $t = 200 \text{ мс}$ от начала срыва.

Таблица 6. Скорости изменения полоидального поля при срыве тока плазмы на обмотке тороидального поля (ОТП), соленоиде (С), обмотке полоидального поля (ОПП), криостате (СР) и несущей структуре ОТП (STR)

t , мс	5	10	15	20	22	25	30	49	100	200
$\dot{B}_{z \text{ OTPI}}$, Тл/с	40,6	-9,3	-22,4	-64,5	88,8	-30,3	-22,8	-19,7	-12,1	-4,7
$\dot{B}_{z \text{ OTPC}}$, Тл/с	37,6	0,2	-12,0	-49,4	-55,2	-24,5	-23,4	-21,2	-13,1	-5,1
$\dot{B}_{z \text{ C}}$, Тл/с	-35,6	-0,6	11,0	45,1	49,2	23,4	22,4	20,2	12,5	4,9
$\dot{B}_{z \text{ OПП5}}$, Тл/с	11,3	-3,5	2,0	9,7	12,1	12,9	13,1	11,5	6,3	1,7
$\dot{B}_{\text{ПСР}}$, Тл/с	-3,3	-2,7	0,4	1,9	1,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1
\dot{B}_{STR} , Тл/с	10,4	7,9	5,6	2,1	0,1	-0,1	-2,7	-3,1	-2,6	-0,1

В В О Д Ы

Результаты численного анализа срыва тока плазмы в установке ИТЭР позволяют сделать некоторые предварительные выводы.

1. В сравнении с предыдущими результатами, полученными без учета внутрикамерных элементов /4, 5/, наличие в расчетной схеме электропроводящих пассивных структур (бланкета с совмещенной защитой, дивертора) в сочетании с низкоомным корпусом вакуумной камеры (22 мкОм) приводит к улучшению пассивной стабилизации при вертикальном движении плазменного шнура и квазипостоянству скорости уменьшения тока плазмы. Движение плазмы имеет при этом преимущественно радиальный характер (см. рис.1).

2. Прирост общего тока плазмы ΔI_{pl} в фазе теплового срыва ζ_1 находится практически в линейной зависимости от изменения степени пикирования профиля плотности тока, в частности,

$\Delta I_{pl} = 0,11 I_{pl}(C)$ при $\Delta C = 0,3$ в (1). Аналогичная зависимость наблюдается между длительностью фазы токового спада и величиной напряжения на обходе шнура. Наибольшее суммарное электрическое напряжение на всех резистивных элементах вакуумной камеры с учетом неоднородности распределения продольного вихревого тока по малому обходу тора составляет 720 В, а на всех зазорах бланкета 2,0 кВ.

3. Расположение максимумов электродинамического давления на стенке бланкета, обусловленного взаимодействием вихревых токов с тороидальным полем, практически симметрично относительно экваториальной плоскости (см. рис.3, 4), максимумы имеют место при $Z = 2-2,5$ м.

4. Увеличение степени секционирования бланкета незначительно влияет на величину давления на элементы дивертора и графитовую защиту, наброс тока в катушке ОПП5, величину изменения полоидального поля на внутреннем обходе ОПП, интегральный параметр J_2 , максимум тока в корпусе камеры $I_{vv\max}$, скорость изменения поля на элементах криостата и несущей структуры ОПП. Более существенно изменение N_{BL} сказывается на силах F_R, F_Z , в частности, при увеличении N_{BL} с 16 до 48 максимум радиальной силы F_{RL} снижается с 11,3 до 2,7 МН.

5. Влияние электрического сопротивления между элементами дивертора, бланкета (защиты) и камеры в направлении малого обхода тора на значения нагрузок и полей становится неразличимым при величине сопротивления более $0,5 \cdot 10^{-3}$ Ом на один торец модуля бланкета.

6. Совместное снижение суммарного переходного сопротивления в тороидальном направлении контактирующих пар бланкет-бланкет, дивертор-дивертор с 10 до 0,02 мОм уменьшает радиальные силы (F_{RI}) в 4,5 раза и повышает осевые силы (F_{z0}) в 1,6 раза, давление на дивертор при этом меняется в 1,4-1,6 раза в зависимости от его конструктивного исполнения, а тороидальный ток в корпусе камеры I_{VVmax} снижается в 3 раза.

7. Увеличение сопротивления резистивных вставок корпуса камеры R_{vB} с 20 до 40 мкОм незначительно влияет на величину доминирующих нагрузок на дивертор и бланкет, а скорость изменения полоидального поля увеличивается при этом существенно: на внутреннем обводе тороидальной катушки - в 1,25 раза

(до $\dot{B}_{zmax} = 102 \text{ Т/с}$);

на центральном соленоиде ($r = 0,91 \text{ м}$) - в 1,58 раза

(до $\dot{B}_{zmax} = 76 \text{ Тл/с}$),

на катушке № 5 полоидального поля - в 1,84 раза (до $\dot{B}_{zmax} = 24 \text{ Тл/с}$).

При таком же увеличении R_{vB} для $N_{Bl} = 32$, $R_c = 1 \text{ мОм}$ интегральный показатель воздействия на сверхпроводник увеличивается в 1,27 раза (до $J_2max = 590 \text{ Тл}^2 \text{ м/с}$), а наброс тока в катушке № 5 при $t = 200 \text{ мс}$ повышается в 1,12 раза (до $\Delta I_5 = 1,49 \text{ МА}$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITER CONCEPT DEFINITION. IAEA, VIENNA, 1989.
2. Астапкович А.М., Комаров В.М., Садаков С.Н. Расчет электромагнитных нагрузок на вакуумную камеру компактного токамака при срыве тока плазмы. М.; 1988 (Препринт НИИЭФА/ЦНИИатоминформ: Б-0790).
3. Астапкович А.М., Дойников Н.И., Комаров В.М., Коршаков В.В., Садаков С.Н. Численное моделирование процесса срыва тока плазмы в токамаке с учетом эволюции плазменного шнура: Сб. "Вопросы атомной науки и техники" (ВАНТ). Серия "Термоядерный синтез". Вып.4. М.: ИАЭ, 1988, 4, с.9-15.
4. Астапкович А.М., Комаров В.М., Садаков С.Н., Филатов В.В. Численное моделирование нестационарных электромагнитных процессов в вакуумной камере ИТЭР. - М., 1989 (Препринт НИИЭФА/ЦНИИатоминформ: Б-0835).

Александр Михайлович Астапкович,
 Виктор Михайлович Комаров,
 Сергей Николаевич Садаков,
 Владимир Викторович Филатов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
 ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
 ПРОЦЕССОВ ПРИ СРЫВЕ ТОКА
 ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ИТЭР

Редактор В.Л.Гусева

Подписано в печать 13.04.90. Т-08286. Формат 60x90/16.
 Offsetная печать. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 150 экз.
 Зак. № 29/808. Индекс 3624. Цена 13 к.