

3422/15

НИИЭФА-Р-В--0836

НИИЭФА П-Б-0836

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

А.М.Астапкович, В.В.Кокотков,
А.Б.Минеев

О СЦЕНАРИИ РЕЖИМА
ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПЛАЗМЫ (q_{пз}-РЕЖИМ)

П р е п р и н т

МОСКВА
ЦНИАТОМИНФОРМ
1989

Астапкович А.М., Кокотков В.И., Минеев А.Б. О сценарии режима продольных параметров плазмы ($q_{||}$ - режим): Препринт 1-0336. - М.: ЦНИИатоминформ, 1989, 12 с., с ил., цена 7 к.

Одним из наименее изученных режимов работы токамака является исследование поведения плазмы при одновременном приближении к пределам по параметрам $q, \langle n_e \rangle \ll B$. Как показывает разработка проектов типа INTOR, реактор-токамак должен работать именно в таком режиме.

В работе приведены особенности и разработаны варианты сценариев выхода на режим предельных параметров на установке масштаба T-10, рассмотрены требования к источникам частиц, необходимые для достижения такого режима.

С Центральным научно-исследовательским институтом информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИатоминформ), 1989 г.

Предварительная проработка опытных термоядерных реакторов типа *INTOR* показала, что в плазме должны быть одновременно достигнуты параметры

$q_I \sim 2,5$; $g \gtrsim 2,5 - 3$; $M \sim 15$; $C_{if} \gtrsim 1$ (изображены в виде овала на рис.1).

Здесь q_I - запас устойчивости на границе шнура;

g - параметр в скейлинге Тройна для β ($\beta = 0,01 g^2 I / aB$);

M - параметр в соотношении для максимальной концентрации плазмы ($\bar{n}_{e,max} = MB/10R$); C_{if} запас по зажиганию.

Единицы: I - MA, a, R - м, B - T, n_e - 10^{20} м^{-3} .

Достижение больших значений

в принципе может сделать реакторную установку более дешевой, меньших - более дорогой.

Как показывают эксперименты на токамаках, в рамках отдельной установки не достигнуто требуемых значений сразу по нескольким из указанных параметров. Имеются отдельные достижения:

$$g = 3; q_I = 2,5;$$

$M = 15$ на разных установках (см. рис.2)^X.

Более продвинуты (в плане комплексной проверки достижимости предельных значений указанных выше параметров) эксперименты на *D-III D* и *PBX*. На них удалось одновременно достичь

$q_I = 2,5$; $g = 3$; $M = 5$ (рис.3). За исключением M и C_{if} это уже близко к значениям параметров, требуемых для спытного реактора, но получены они при невысоком уровне тороидального поля ($B = 0,8-0,9 \text{ Тл}$). При этом уровень средней концентрации электронов плазмы порядка $(0,3-0,5) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ в *D-III D* и *PBX* достигался без *pellet* инжекции (газонапуском).

Наибольший отрыв данных эксперимента от реакторных требований наблюдается по параметру C_{if} или по имеющей тот же смысл

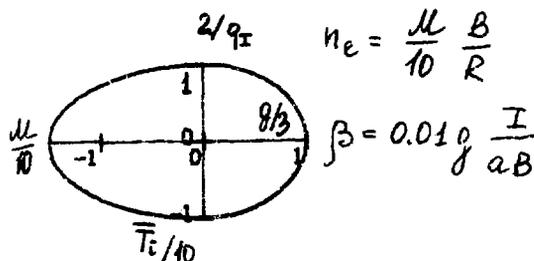


Рис.1. Овал, соответствующий значениям параметров, требуемым для опытного реактора

^X Данные shot / ов по установкам JET (б), T-10 (г), ASDEX (д), TEXTOR (е) представлены Р.Н.Литуновским, по D-III (в) использованы из /3/, по TFTR (а) - из /4,5/

величине $n_e(t)T_i(t)\tau_E$ (ниже параметр nTt ; здесь $n_e(t)$, $T_i(t)$ - значения концентрации электронов и температуры ионов на оси плазмы; τ_E - энергетическое время жизни плазмы). В экспериментах на токамаках JET и TFTR получено $nTt = (1-3) \cdot 10^{20}$ кэВ.с.м⁻³. В форсированном режиме предполагается достичь на этих установках $nTt = (5-10) \cdot 10^{20}$ кэВ.с.м⁻³, а для зажигания $C_{ig} \gg 1$ требуется по оценкам $nTt > 50 \cdot 10^{20}$ кэВ.с.м⁻³.

Таким образом, достижение $C_{ig} > 1$ и исследование термоядерного горения переносится на компактные установки типа CIT либо на полномасштабный реактор типа INTOR или ITER.

В то же время комплексной проверки одновременной достижимости параметров $q_1 = 2,5$, $q = 3$, $M = 15$ на токамаках еще не проводилось. Можно показать, что такая проверка значительной части требуемой для реактора информации в принципе осуществима на небольших установках с параметрами:

$a \sim 0,3 - 0,5$ м; $B \sim 2 - 8$ Тл; $\langle T \rangle \sim 1$ кэВ,
в частности, на проектируемой установке T-100.

Ниже режим с комплексной проверкой достижения максимальных значений q_1^{-1} , n , β и исследования характера удержания при предельных параметрах назван $qn\beta$ - режимом (рис.4).

Основная особенность $qn\beta$ - режимов - одновременное применение мощных источников частиц (газонапуск + pellet - инъекция) и энергии; проверка работоспособности систем, воспринимающих потоки частиц и энергии, - камеры и дивертора.

Одна из важнейших задач $qn\beta$ - режимов - согласование источников частиц и энергии, необходимое в реакторе, но почти не исследованная экспериментально (особенно при pellet -инъекции).

Отметим, что исследование $qn\beta$ - режимов на ряде установок с увеличивающимися геометрическими размерами и тороидальным полем B может привести к созданию экономичного термоядерного реактора. При таком увеличении размеров и поля возрастают

$\langle T \rangle$, nTt и значение C_{ig} .

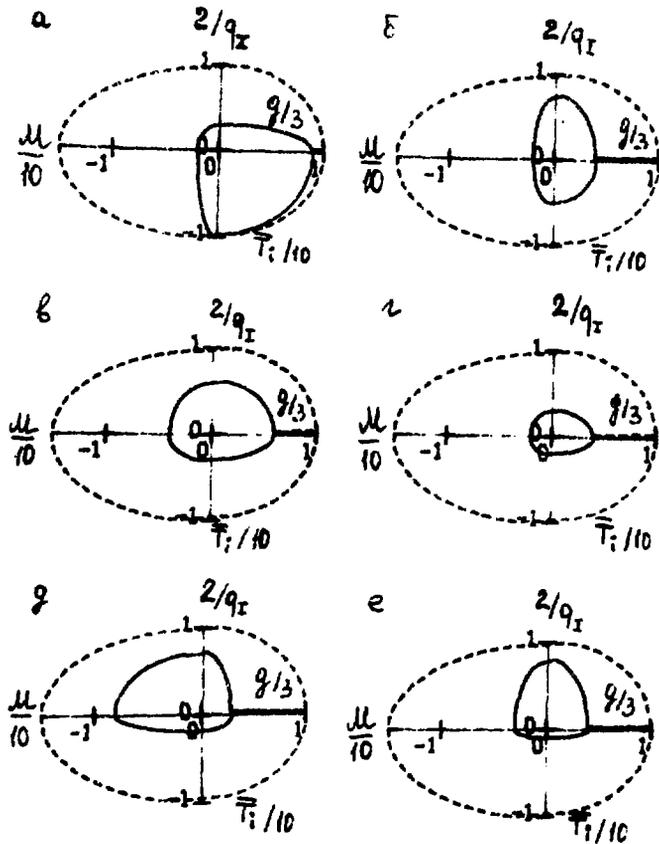
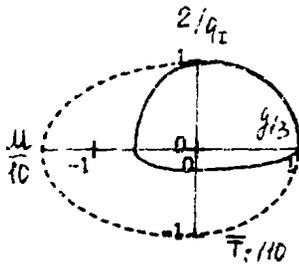


Рис.2. Достигнутые в экспериментах на ряде токамаков значения параметров (сплошные кривые) в сравнении с требуемыми для реактора (пунктирные кривые)

По мере приближения к предельным значениям q_I^{-1} , β , μ энергетическое время жизни плазмы должно уменьшаться. Фактически исследование τ_E и является одной из основных задач $q \ll \beta$ -режима. При предварительной оценке предельных параметров плазмы предполагалось, что τ_E при выходе на $q \ll \beta$ -режим определяется комбинацией скейлингов - неоклассического и Кайе-Голдстона.

Возможны различные варианты выхода на режим предельных параметров. Предполагается следующий сценарий.



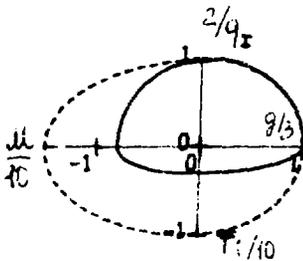
РВХ

$$\beta_t = 5.3\%$$

$$V_0 = 0.9 T_n$$

$$\bar{n} \sim 0.3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$$

16/



D-III-D

$$\beta_t = 6.2 - 6.9\%$$

$$V_0 = 0.8 T_n$$

$$\bar{n} \sim 0.4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$$

17/

Рис.3. То же, что и на рис.2, для токамаков РВХ и D-III-D

1. q_{min} достигается к моменту выхода на плато тока. Увеличение концентрации $n_e(t)$ обеспечивается газонапуском. Из представлений об оптимальном газонапуске /1/ выбрано на стадии подъема тока $n_e(t) \sim I(t)$

2. При $q = q_{min}$ концентрация плазмы увеличивается с помощью pellet-инъекции до $n_e = n_{e,max}$ с одновременным включением дополнительного нагрева.

3. Выход на предельные β происходит за счет управления вкладом мощности нагрева.

Такой сценарий описывается диаграммой

$$q_{min} \rightarrow q_{min} n_{max} \rightarrow q_{min} n_{max} \beta_{max}$$

В табл. I приведены параметры сценария для установки класса T-10 с ЭЦР нагревом. Следует отметить, что удержание плазмы в $q_{n\beta}$ -режиме может быть хуже, чем в обычных, а мощности 5 МВт недостаточно для достижения предела по β из-за увеличения тепловых потерь. В таком случае достижение параметров

$q_{n\beta}$ - режима проде при уменьшенном значении тороидального поля в плазме. Параметры такого сценария при $B=3$ Тл приведены в табл.2. Расчеты этого сценария проведены при мощности ЭЦР 3,5 МВт, т.е. с резервом на ухудшенное удержание.

При разработке сценариев достижения $q_{n\beta}$ - режима использовалась программа SCENB, основанная на двухкомпонентной модели энергетического баланса плазмы (см./2/).

Сделаем несколько замечаний по параметрам $q_{n\beta}$ - режимов, приведенных в табл.1, 2.

а). Значение $\varepsilon\beta_j$ ($\varepsilon = a/R$) составляет $\varepsilon\beta_j \approx 0,5$, что не очень велико и меньше уже достигнутого в эксперименте (TFTR : $\varepsilon\beta_j \approx 0,7$).

б). Время обмена энергией между электронной и ионной компонентами $\sim 10-20$ нс существенно меньше энергетического времени жизни плазмы, поэтому $T_e \approx T_i$, а значение nTt (при параболических профилях n и T) масштаба (1-2) $\cdot 10^{20}$ кэВ.с/м³ - на уровне nTt на крупнейших существующих токамаках.

в). Эффективная частота соударений в $q_{n\beta}$ - режиме не слишком мала $0,1 < \nu_{e*} < 1$ из-за больших n и умеренных T .

г). Сравнительно небольшие значения температуры плазмы приводят к тому, что требуемые параметры pellet - инжектора не слишком велики.

Условия слабого возмущения концентрации плазмы при pellet - инъекции, баланса частиц и торможения pellet'a в центральной области плазмы позволяют оценить параметры pellet'ob :

частота инъекции $f \sim 15-20$ Гц,
 радиус pellet $r_{pe} \sim 0,7-0,6$ мм,
 скорость pellet $u \sim 1,5-1$ км/с,

при этом на протяжении разряда (≈ 1 с) необходима инъекция 15-20 pellet'ob .

Параметры таких инжекторов pellet лежат в уже освоенном экспериментально диапазоне (кроме частоты f). Разработка же pellet - инжекторов, работающих в частотном режиме, составляет часть общей стратегии движения к установкам масштаба ИНТОР, ИТЭР.

д). Задача согласования источников частиц и энергии, как уже отмечалось выше, - одна из основных при исследовании $q_{n\beta}$ - режимов. Она осложняется тем, что характер поглощения как вводимой мощности нагрева (например ЭЦР нагрева), так и pellet зависит от плотности.

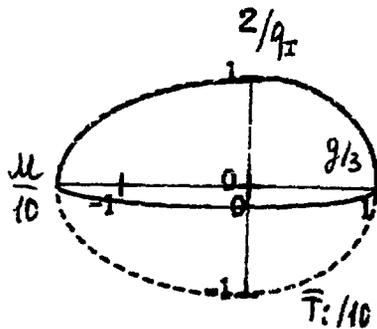


Рис. 4. Сплюснутая кривая поясняет идеологию q_{π} - установок

По мере увеличения плотности плазмы область поглощения энергии и частиц (при фиксированных параметрах источников) будет перемещаться по шнуру. Это может потребовать изменения во времени рабочей частоты источника ЭЦР нагрева и параметров *pellet* - инжектора.

е) Оценки показывают, что скорость откачки газа из дивертора в режимах, указанных в табл. 1, 2, масштаба $10 \text{ м}^3/\text{с}$; средний тепловой поток на стенки камеры $\sim 0,2-0,3 \text{ МВт}/\text{м}^2$; в дивертор $\sim 1,5-2 \text{ МВт}$.

Таблица I.

Сценарий $q \approx 2$ - режима

Стадии	Лавина	Кулон	Быстрый подъем	Медленный* подъем	Плато тока	Плато доп. нагрева	
Время, с	0	$2.4e-3$	$4.8e-3$	0.073	0.40	0.62	1.40
Тороидальное поле, Тл	4	4	4	4	4	4	4
Ток, А	0	$19e3$	$28e3$	$0.3e6$	$0.8e6$	$0.8e6$	$0.8e6$
Плотность, m^{-3}	0	$0.33e18$	$3e18$	$2.1e19$	$1.0e20$	$1.4e20$	$1.4e20$
Радиус плазмы, м	0	0,3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Большой радиус плазмы	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Напряжение на обходе, В	-	-	31.2	18.5	7.03	0.377	0.204
Температура электронов, кэВ	0	$8e-3$	$10e-3$	0.275	0.467	1.56	2.83
Вытянутость	1	1	1	1	1.6	1.6	1.6
Активный поток, В.с	0	0.027	0.053	0.212	0.809	1.02	1.16

Продолжение табл. I

Стадии	Лавина	Кулон	Быстрый* подъем	Медленный подъем	Плато тока	Плато доп. нагрева	
Индуктивный поток, В.с (в линейном приближении)	0	0.50	0.113	1.21	2.84	2.84	2.84
Запас устойчивости	-	-	40.2	3.75	2.5	2.5	2.5
Бета тороидальная, β	-	-	$1.5e-6$	$2.4e-4$	$2.1e-3$	$9.5e-3$	$1.7e-2$
Бета токовая, β_c	-	-	0.07	0.095	0.299	1.37	2.46
Эффективный заряд			1	3	1.5	1.5	1.5
Рабочий газ			дейтерий				
Мощность ЭЦР нагрева, Вт	0	0	0	0	0	$5e6$	$5e6$
Скейлинг			Неоалкаторный			Неоалкаторный + Кея-Голдстона, H-мода	
Время удержания по скейлингу			0.003	0.011	0.170	0.153	0.153

Таблица 2

Словарий параметров - режим, $B = 3 \text{ Тл}$

Стадии	Лавина	Кулон	Быстрый подъем	Медленный подъем	Плато тока	Плато доп. нагрева	
Время, с	0	$2.4e-3$	$4.8e-3$	0.073	0.40	0.62	1.60
Тороидальное поле, Тл	3	3	3	3	33	3	
Ток, А	0	$19e3$	$28e3$	$0.3e6$	$0.55e6$	$0.55e6$	$0.55e6$
Плотность, м^{-3}	0	$0.33e18$	$3e18$	$1.4e19$	$8.0e19$	$1.0e20$	$1.0e20$
Радиус плазмы, м	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Большой радиус плазмы	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Напряжение на обходе, В	-	-	31.2	18.6	4.32	0.323	0.201
Температура электронов, кэВ	0	$8e-3$	$10e-3$	0.285	0.354	1.34	2.15
Вытянутость	1	1	1	1	1.6	1.6	1.6
Активный поток, В.с	0	0.027	0.053	0.208	0.804	0.984	1.19
Индуктивный поток, В.с (в линейном приближении)	0	0.050	0.113	1.21	1.95	1.95	1.95
Запас устойчивости	-	-	30.1	2.82	2.73	2.73	2.73

Продолжение табл.2

Стадии	Лавина	Кулон	Быстрый подъем	Медленный подъем	Плато тока	Плато лог. нагрева	
Бета, β	-	-	2.6e-6	2.9e-4	2.2e-3	1.0e-2	1.6e-2
Токовая бета, β_d	-	-	0.07	0.07	0.384	1.76	2.77
Эффективный заряд			1	3	1.5	1.5	1.5
Рабочий газ		Дейтерий					
Мощность ЭЦР нагрева, Вт	0	0	0	0	0	3.5e6	3.5e6
Скейлинг		Неоалкатронный				Неоалкатронный + Кея-Голдстона, H-мода	
Время удержания по скейлингу			0.003	0.007	0.148	0.115	0.115

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены характеристики режима с комплексной проверкой достижения максимальных значений величин q_1^{-1} , n , β (q_1/β - режим) в токамаке масштаба Т-10. Предложены сценарии выхода на такой режим.

Основная особенность q_1/β - режима - своеобразный "проточный" режим работы с мощными источниками частиц и энергии и мощной системой откачки газа из дивергтора. Особую остроту в этом режиме приобретает вопрос согласования источников частиц и энергии, вводимых в плазму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ноткин Г.Е. // Физика плазмы. 1985. Т.П, вып. I. С.62.
2. Астапкович А.М., Кокотков В.В., Минеев А.Б. Модель энерго-баланса плазмы в токамаках. - М., 1989 (Препринт/НИИЭФА ЦНИИатоминформ: 1989).
3. Grouber R.J. et al. Experimentally interred ion thermal diffusivity profiles with Doublet III tokamak: Comparison with neoclassical theory // Nucl.Fus. 1986. V.26, No 5. P.543.
4. Murakann M. et al. Confinement studies of neutral beam heated discharges in TFTR // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1986. V.28, No 1A. P.17-27.
5. Nauryluk R.J. et al. TFTR Plasma Regimes 11 Int.Conf.on Plasma Phys.and Cont.Fus.Res., Kyoto, 1986, IAE-CN-47/A-1-3.
6. Bol K. et al. High Beta Plasmas in the PBX Tokamak. Plasma Phys.Lab, Prienstan, Univ., PPPL-2327, 1986.
7. Новости термоядерных исследований. Вып. I(47). М.: ЦНИИатоминформ, 1988. С.24-28.

Александр Михайлович Астапкович,
Вадим Викторович Кокотков,
Анатолий Борисович Минеев

О СЦЕНАРИИ РЕЖИМА ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПЛАЗМЫ (q, n, β -РЕЖИМ)

Редактор В.Л.Гусева

Подписано в печать 11.12.89 г. Т-18208. Формат 60x90/16.
 Офсетная печать. Уч.-изд.л. 0,5. Тираж 130 экз. Зак. № 15/444 .
 Индекс 3624. Цена 7 к.

Отпечатано в НИИЭФА