

# **35-я Европейская конференция по физике плазмы (избранное)**

---

Часть 1 - В. В. Поступаев (краткий обзор экспериментов)

# Краткая статистика

---

35<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics, 9-13.06.2008, Херсониссос, Крит, Греция

- конференц-центр Creta Maris
- 4 параллельные секции устных докладов (магнитное удержание плазмы, инерциальный синтез, неидеальная и пылевая плазма, общая и астрофизика)
- около 1000 докладов (из них ~85 приглашённых, ~60 устных, ~800 постеров)
- три спецсессии (заседание по ИТЭР, образование, женщины в науке)
- в числе членов программного комитета нет никого из России
- число участников (на глаз): человек 700-800, *не более 2 работ на автора*
  
- от России ~50 участников, 2 приглашённых доклада:
  - О.Петров – по пылевой плазме (ИВТАН)
  - Т.Лисейкина – расчёты ультракоротких лазерных импульсов в плазме (ИВТ)

*Эксклюзивная программа-бонус для участников из ИЯФ:*

- *землетрясение в аэропорту Афин*
- *попытка улететь домой на несуществующем рейсе*

# Alfven Prize

---

«За выдающийся вклад в физику плазмы»

награждён Liu Chen (UC Irvine + Inst. Fusion Theory and Simulations, Hangzhou)

работы по теории Альфвеновских волн в космической и лабораторной плазме

*... главное – хорошо знать Конфуция*

# Статус ИТЭР (разговоры)

---

- идут подготовительные работы на площадке
- строится спецдорога ( $P = 900$  т,  $D = 9$  м,  $l = 60$  м)



- комиссия Janeschitz – review проекта ITER-FEAT и рекомендации
- более 80 предложений и замечаний, идёт отсев рекомендаций
- *пример:* активные катушки для борьбы с RWM – переделка всей камеры
- ожидается увеличение стоимости строительства ~30% + 2 года задержка  
были крупные ошибки в оценке стоимости ряда систем
- на конференции огромное количество расчётов сценариев ИТЭР

# Статус ИТЭР (официально)

---

## Press Release



FOR IMMEDIATE RELEASE

Contact:

Neil Calder

Tel: 00 33 (0)6 14 16 41 75

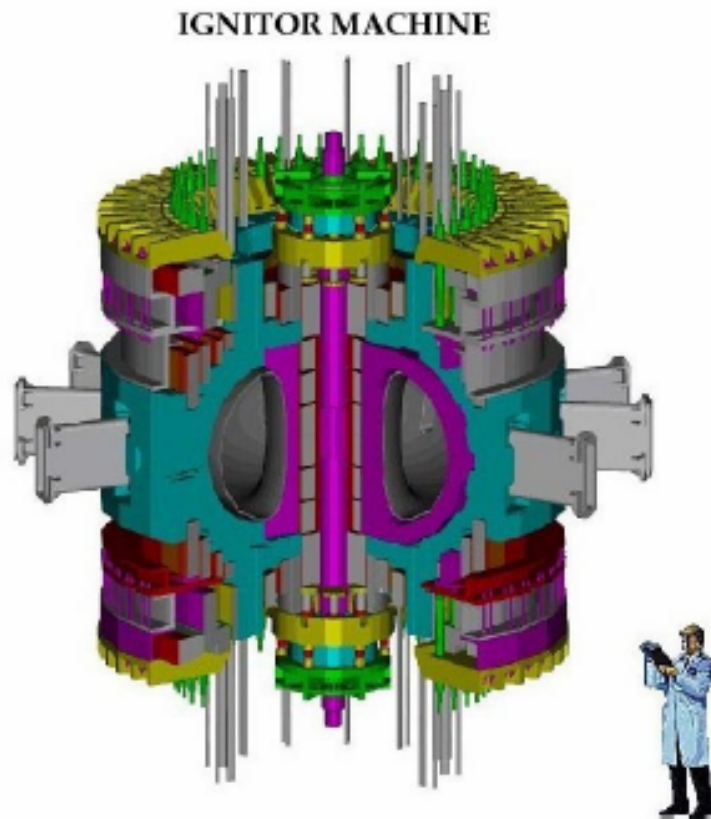


CEA Cadarache  13108 St Paul Lez Durance France  
+ 33 (0) 4 42 19 98 18  [www.iter.org](http://www.iter.org)

- 18 июня (вчера) состоялся второй Совет ИТЭР в Аомори
- объявлено о начале переговоров об условиях членства Казахстана
- объявлено о new Project Specification proposed by the ITER Organization
- объявлено о создании комиссии Briscoe по пересмотру проекта и графика
- объявлено о задержке включения до 2018 года

# Проект IGNITOR – В.Сорпи (MIT)

- цель проекта: максимально быстрое и дешёвое зажигание, без технологий
- оценка стоимости ~200 M\$ (машина масштаба Т-10)
- формально – Италия, «крыша» - MIT, коллабораторы из EU и России (ИЯФ ???)
- почти все катушки из меди, кроме двух самых больших из сверхпроводника
- новый сверхпроводник:  $MgB_2$ ,  $T_{кр} \sim 40$  К,  $B_{кр} \sim 55$  Тл, в проекте 4.5 Тл при 15 К, материал производится серийно



major radius	$R_0$	1.32 m
minor radius	$a \times b$	0.47×0.86 m
aspect ratio	$A$	2.8
elongation	$\kappa$	1.83
triangularity	$\delta$	0.4
toroidal field	$B_T$	$\leq 13$ T
toroidal current	$I_p$	$\leq 11$ MA
maximum poloidal field	$B_{p,max}$	$\leq 6.5$ T
mean poloidal field	$\bar{B}_p \equiv I_p / 5\sqrt{ab}$	$\leq 3.5$ T $\ll$
poloidal current	$I_\theta$	$\leq 9$ MA
edge safety factor @ 11 MA	$q_\psi$	3.6
plasma volume	$V$	$\approx 10$ m <sup>3</sup>
plasma surface	$S$	$\approx 34$ m <sup>2</sup>
ICRF heating (70-140 MHz)	$P_{RF}$	18 – 24 MW
Optimal ICRH (115 MHz)	$P_{RF}^{OP}$	3–5 MW

# От ИТЭР к DEMO (Boozer)

---

- чисто токамачные пути к реактору встречают ряд трудностей
- в DEMO будет проблема внешнего управления плазмой (нагрев плазмы от альфа-частиц, bootstrap ток > 90%, самосогласованные профили давления -> единственная внешняя ручка, которые можно крутить – это треугольность)
- в токамаках проблема из-за  $\delta B/B$  -> синхронизация мод -> срыв
- предложение: переход к частично стеллараторной конфигурации с отказом от тороидальной симметрии системы
- аргументы:
  - в стеллараторах отсутствует предел Гринвальда и плотность можно поднять
  - при  $t_{vac} > 0.15$  в стеллараторах с током не наблюдалось срывов
  - из-за большой плотности нет проблем с быстрыми частицами  
(низкая плотность в токамаке -> высокая температура для мощности реакций  
-> много быстрых альфа-частиц -> неустойчивости и потери быстрых частиц)

*«Я никогда не понимал, откуда берётся предел Гринвальда» Boozer*

# JET – материаловедение (Brezincheck)

---

- в DT кампании-1997 из 35 г трития в камере осталось связанными с пылью 6 г
  - в пересчёте на ИТЭР 700 г наберётся уже через ~100 импульсов по 400 с
  - исследования миграции пыли и графита: сверху впрыск  $^{13}\text{C}$
  - концентрируется в области внутреннего дивертора,  $\sim 4 \cdot 10^{18}$  ат/см<sup>2</sup>
  - зависимость от энергии ELM ( $W_{\text{ELM}} 200 \downarrow 20$  кДж  $\rightarrow$  C redeposition падает в 10 раз)
  - подготовка поверхности камеры между выстрелами: если по «грязной» стенке отношение  $\text{C}_2/\text{CD} \sim 0.4$ , то для «твёрдой» оно уменьшается до  $\sim 0.2$
  - «помахивание» (sweeping) положением ноги дивертора: происходит миграция трития в другие точки камеры
- 
- планы на конец 2008-2009 гг: замена 4000 плиток в диверторе на вольфрам



## JET – удержание (McDonald)

---

- получено  $\beta_N$  до 3.6, но при этом  $H_{H98(y,2)} = 1$  (т.е. никаких ИТВ)
- быстрая деградация удержания с ростом  $\beta_N$
- предсказание для ИТЭР:  $H_{H98(y,2)} = 1.5$  при  $\beta_N = 3.5$  нереально

## JET – предел по бета (Грязневич)

---

- при  $\beta_N = 2.8$  держат до 35  $\tau_E$ ,  $H_{H98(y,2)} = 1.12$  (никаких ИТВ)
- коллапс бета: включение либо тиринг-моды  $n=1$ , либо RWM (как на D3D)

# JET – диагностики для ИТЭР (Murani)

---

- 90 систем работают, 20 в наладке, 10 Тбайт/импульс
- новое: plasma-wall, ИК и видимый из одного объёма  
ИК: 3.5-5 мкм, 640x512 Emerald InSb, видимый: 250 кГц Photron APX-RS
- обнаружено много летающих в плазме частиц (графит)
- как и раньше, есть чешуйки со стенок
- обнаружены сферические частицы 10 нм -1 мкм, не касавшиеся стенок
- MARFE: прослежена динамика от рождения до большого срыва, по ИК видно за 1-2 с -> предсказание срыва?
- спектроскопия в диверторе: видят переходы до 15-2 (~3712 А)
- диагностика связи центра и края: улучшена тороидальная CXRS, 4 профиля одновременно, 10 мс, 2.5 см, 22 канала
- борьба с большими ELM: инжекция неона, до 30% от напуска дейтерия
- быстрые частицы: 2 камеры CsI(Tl) по 19 каналов, реакция  ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$  3.1 МэВ
- видят банановые орбиты в нейтронном изображении!

# JT-60U – результаты (Ide)

---

- интенсивные работы по wall conditioning, критика из зала (не реакторопригодно)
- в 2007 два перпендикулярных пучка удлиннили с 10 до 30 с
- плазма со слабым широм (кандидат на стационарный режим)  
full current drive LHCD+NBCD на 2 с, потом пробой в одной из систем,  $q_{\min} > 2$
- плазма с отрицательным широм (пик тока вне оси)  
достигнуто уменьшение  $q_{95}$  с 8.5 до 5.5, при этом  $f_{bs}$  с 50% до 90%
- попытка закрутить плазму с тангенциальной NNBI, работает только 2 с, потом прекращение вращения по причине либо RWM, либо bursting mode  $m=1$  -> срыв
- подготовка стенки: технология восстановила стенку после срыва с  $W = 3.1$  МДж
- поиск технологий подготовки стенки для сверхпроводящих систем (обычные СВЧ или тлеющие разряды в слабом поле нельзя): введение горизонтального поля, при этом с ECRH плазма заполняет всю камеру
- задача на остаток 2008: ECRH до 30 с (12 МДж), NNBI до 30 с @ 2 МВт (60 МДж)

# JT-60U – планы на будущее (Ide)

---

- планы: JT60U -> JT60SA (= Super-Advanced, сверхпроводящий)
- останов машины в конце лета, финальные результаты на МАГАТЭ-2008
- цели и задачи новой машины:
  - поддержка ИТЭР
  - steady state
  - human training
- от существующей машины используются:
  - энергетика
  - нейтральные пучки (положительные и отрицательные ионные источники)
  - ЭЦР на 110 ГГц
- планы: ток 5.5 МА, нагрев до 41 МВт, **beta\_N = 5.5** в течении 100 с (нынешний рекорд по beta\_N = 2.8 в течение 28 с)

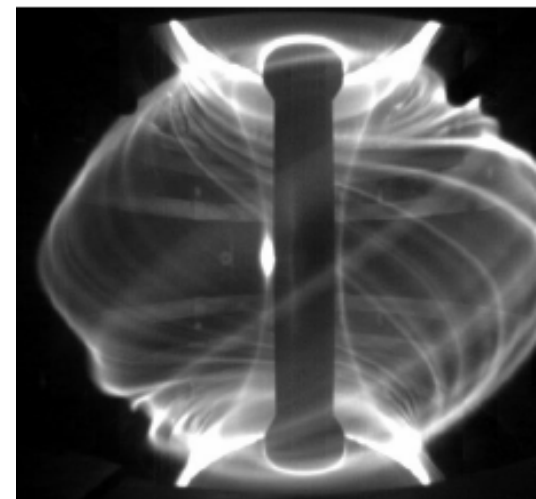
*Вопрос из зала: в бюджете не хватает 150M\$, где возьмёте?*

*Ответ: не знаю.*

# Изучение ELM на MAST (Dudson)

---

- поставили сверхскоростную камеру на 100 кГц
- ELMоподобные структуры есть всегда, в т.ч. в L-моде и между ELM
- тороидальная мода 20-90, живут 40-60 мс
- филаменты ориентированы по полю
- во время ELM скорость растёт на дистанции  $\sim 10$  см, мода 10-20 с 1 до 9 км/с по радиусу, и с 2-9 до 10-30 км/с по тору (ускорение против тока)
- рождаются на сепаратрисе – peeling-ballooning boundary
- плотность  $\sim 10^{12}$  1/см<sup>3</sup> – 10% от плазменной



*старая картинка с MAST*

# ASDEX – стенка из W и ИТЭР (Sips)

---

- полностью вольфрамовая камера, от 5 до 200 мкм W на графите, напыление
- 1 MA ток, 16 МВт нагрев (NBI+ICRH+ECRH)
- углерод в камере упал с 16 г до 1 г после перехода на вольфрам
- концентрация C в плазме упала с 2% до <1%
- D retention: уменьшение с 4% до <0.3% (внешний дивертор), но уже не в форме CD, а в насыщении стенок
- доля излучения из дивертора упала с 40% до 15%, из центра с 40% до 50%
- вольфрам копится в центре (неоклассический пинч), ~10-20% радиуса
- попытки удаления вольфрама при помощи ECRH (?)
- вольфрам распыляется примесными C, O
- подготовка стенки – 200 часов отжиг при 150 C, потом разряд в гелии

# Пыль в плазме (Крашенинников)

---

- для ИТЭР пределы и оценки количества пыли  
было: 11 кг Ве, 230 кг W, 15 кг С  
пересмотрено: по 6 кг для Ве и С
- новая проблема: горячая пыль + вода  $\rightarrow$   $H_2 + O_2 \rightarrow$  взрыв
- D3D: 100 г графитовой пыли в установке
- JT-60U: в пыль уходит  $\sim 10\%$  от распылённого графита
- пыль видят по центральному каналу томсона при работе на частоте
- в D3D спектр пыли по размерам очень похож на ГОЛ-3
- там же в кадре быстрой камеры видно от 10 до 100 пылинок в плазме
- после вскрытия уровень пыли повышен на  $\sim 100$  выстрелов
- скорость пылинок до 0.5 км/с, на FTU видят до неск. км/с  $\rightarrow$  кратеры на стенке

# High beta at LHD (Sakakibara)

---

- получено тройное произведение  $0.5 \cdot 10^{20}$  (токамаки  $10^{21}$ ), только  $T = 0.5$  кэВ
- получено  $\beta = 5\%$  при 20 МВт инжекции в 2006  
плотность  $\sim 4 \cdot 10^{19}$  1/m<sup>3</sup>, температура – 0.5 кэВ
- при  $\langle \beta \rangle = 4.8\%$   $\beta_0 = 9.6\%$ , такая плазма удерживается 85  $\tau_E$
- параметры плохие, шафрановский сдвиг до 25% и пучки не попадают в плазму
- подъём плотности либо поддувом газа, либо пеллет-инжекцией
- с ростом  $\langle \beta \rangle$  с 4.8% до 5% сильная деградация удержания (из-за появления областей стохастического поля на краю, зона удержания меньше на 32%)
- планы: ввести real-time управление границей плазмы в FY2008



# Новые режимы на RFX (Valisa)

---

- подняли ток до 1.5 MA на 0.17 с (спадает до 0 за 0.35 с)
- активное управление границей плазмы  
576 датчиков поля, 192 катушки, 25 кГц, 2.5 мТ AC + ~50 мТ DC
- плотность  $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $T = 1 \text{ кэВ}$
- quasi single helicity: мода  $m = 1$ ,  $n = -7$ , улучшили отношение амплитуды этой моды к остальным, QSH из «острова» стало новым центром
- результат: доля высокотемпературной зоны выросла с ~10% до ~60% по R
  
- японцы закрыли TPE, но построили новый пинч ...

## Стационарные режимы ИТЭР (Garcia)

---

- расчёты сценариев на 3000 с при  $Q = 5$  и  $f_{bs} = 50\%$
- получается  $T_{ped} = 8.3$  кэВ без ИТВ, это слишком много для дивертора
- коды давали потерю ИТВ через  $\sim 100$  с, т.е. неск. времен диффузии тока
- новый сценарий: ECR+ICR+LHCD = 20+20+13 МВт, **никакой NBI !!!**  
 $f_{bs} = 70\%$  и  $T_{ped} = 3$  кэВ

## Сверххолодная плазма (Killain)

---

- цель: изучение неидеальной плазмы с  $\gamma$  до 5
- сверххолодные пары Sr при  $T \sim 1$  мК (получаются лазерным охлаждением)
- каскадная ионизация двумя лазерами,  $T_e \sim 1$  К
- плотность  $\sim 10^{10}$  1/м<sup>3</sup>
- основной процесс – 3-частичная рекомбинация, rate  $\sim n^3/T^{9/2}$

# Fast Ignition (Tabak)

---

- статусный обзор
- оптимизм заметно поуменьшился:  
исходное предложение 100 кДж + 10 кДж быстрых  
сейчас 300 кДж + 43 кДж быстрых
- схемы доступа быстрого пучка к центру мишени:
  - «сверление» длинным пучком
  - «релятивистская прозрачность» для малых плотностей
  - входной конус (японские работы)
  - прямая генерация быстрых ионов амбиполярными потенциалами
- планируют пробовать на NIF в режиме непрямого обжатия мишени  
это противоречит всей философии fast ignition, но другого лазера у них нет