

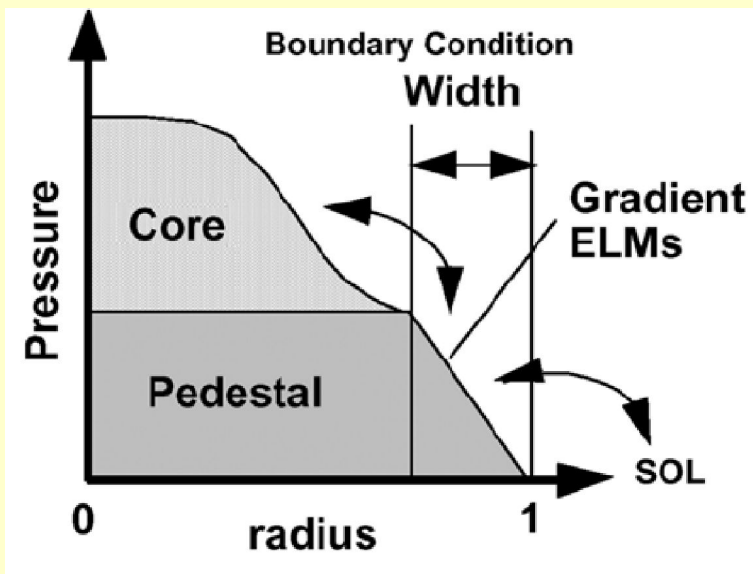
Курс лекций: Физико-технические основы токамака-реактора ИТЭР

Владимир Юрьевич Сергеев

проф., д.ф.м.н., кафедра физики плазмы
физико-технический факультет СПбГПУ

Содержание лекции № 8-10 «Динамика и перенос в пьедестале»

- 8.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах
- 8.2. Структура и характеристики пьедестала
- 8.3. L-H переходы
- 9.1. Теория и моделирование переноса в пьедестале
- 9.2. Моделирование структуры пьедестала
- 9.3. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения
- 10.1. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»
- 10.2. Устойчивость пьедестала
- 10.3. Возможные сценарии управления пьедесталом



- Параметры пьедестала важны, потому что они определяют граничные условия для центральных областей плазмы, а также источник тепла и потоки частиц в плазме SOL и дивертора (Рис. 52). Например, Q в стандартном режиме ИТЭР напрямую зависит от T_i в пьедестале

Рис. 52. Радиальные профили плазменного давления.

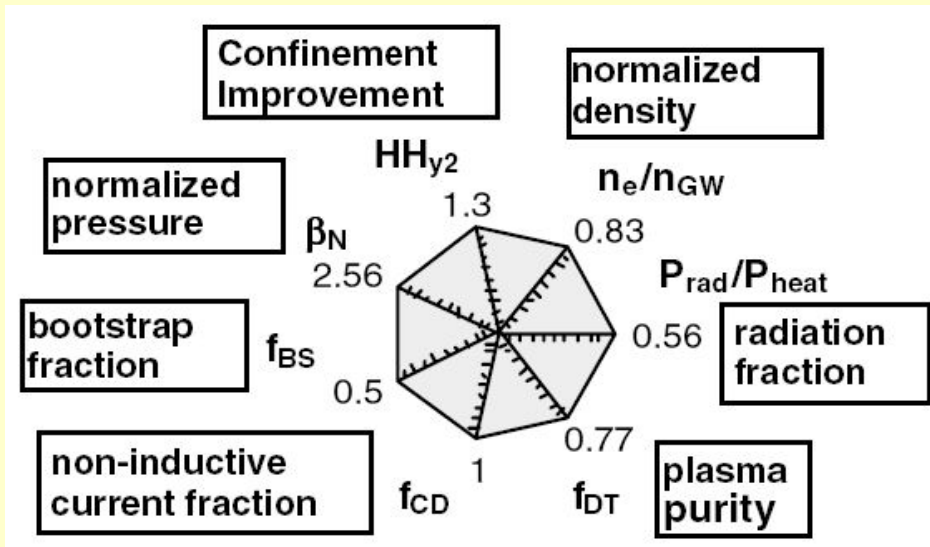


Рис. 53. Набор параметров плазмы, требуемые для стационарной работы ИТЭР

- Пьедестал Н-моды играет центральную роль в одновременном достижении набора параметров требующихся для стационарного горения плазмы в термоядерной электростанции: высокие значения Н-фактора, плотности плазмы, чистоты топлива, фракции радиационных потерь, β_N , фракции неиндуктивного и бутстреп-тока (Рис. 53)

- Поясним сказанное выше. Благодаря «жесткости» профиля температуры, удержание энергии и Q зависят от температуры пьедестала, которая уменьшается с ростом плотности пьедестала, потому что давление пьедестала примерно постоянно из-за ELMs. Поэтому, чтобы достичь хорошего удержания энергии при большей плотности, нужно как-то повышать давление. Для МГД устойчивости при больших β_N нужно также увеличивать давление пьедестала, чтобы достичь широкого профиля давления в центре, так как умеренный градиент давления в центральных областях стабилизирует глобальные идеальные моды с малыми n и NTM.
- Для поддержания профиля тока с оптимальной для удержания и устойчивости формой, распределения граничного бустреп-тока также должно быть оптимальным.
- Температура, плотность пьедестала и ELMs определяют экранирование и накачку примесей, таким образом, играя ключевую роль в управлении частицами (чистоте) плазмы.
- С другой стороны, надо следить за минимальными тепловыми нагрузками ELM на диверторные пластины, которые растут в срывах Type I ELM с ростом давления пьедестала.
- Отсюда следует, что в зависимости от задач, давление в пьедестале надо оптимизировать.

Содержание лекции №4 «Динамика и перенос в пьедестале»

4.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах

4.2. Структура и характеристики пьедестала

4.3. L-H переходы

4.4. Теория и моделирование переноса в пьедестале

4.5. Моделирование структуры пьедестала

4.6. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения

4.7. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»

4.8. Устойчивость пьедестала

4.9. Возможные сценарии управления пьедесталом

4.10. Выводы по теме «Динамика и перенос в пьедестале»

- Одна из основных физических проблем, сформулированных в ИРВ (1999), это **трудность поддержания H-моды при больших плотностях плазмы**, обеспечиваемых газовым напуском. Type I ELMы H-mode confinement database показывает, что $\tau_E \sim n_e^{0.41}$ при умеренных плотностях и насыщается, или даже снижается при приближении к операционному пределу (Гринвальда).

- Напомним:

Фактор улучшенного удержания:

$$H_{H98(y,2)} = \tau_{exp} / \tau_{H98,y2};$$

$\tau_{exp} = W/P$; где W - энергосодержание плазмы, а P – вкладываемая мощность

Известный скейлинг для времени удержания:

$$\tau_{H98,y2} \sim n_e^{0.41}$$

Подставив, получается

$$H_{H98(y,2)} = W / (P \times n_e^{0.41})$$

- Из Рис. 54(a) видно, что $H_{H98(y,2)}$ фактор уменьшается с ростом плотности на примере JT-60U [Urano H. *et al* 2002 *Nucl. Fusion* **42** 76]. В Type I ELMы H-mode, давление пьедестала ограничивается ELMs, так что $T_{e-ped} \downarrow$ когда $n_{e-ped} \uparrow$ (Рис. 54(b)) и T_{core} также \downarrow , благодаря эффекту «жесткости» профилей (см. Рис. 54(c)).

Таким образом, энергосодержание плазмы не растёт при увеличении концентрации в пьедестале, и следовательно, H-фактор уменьшается с ростом концентрации (Рис. 54(a)).

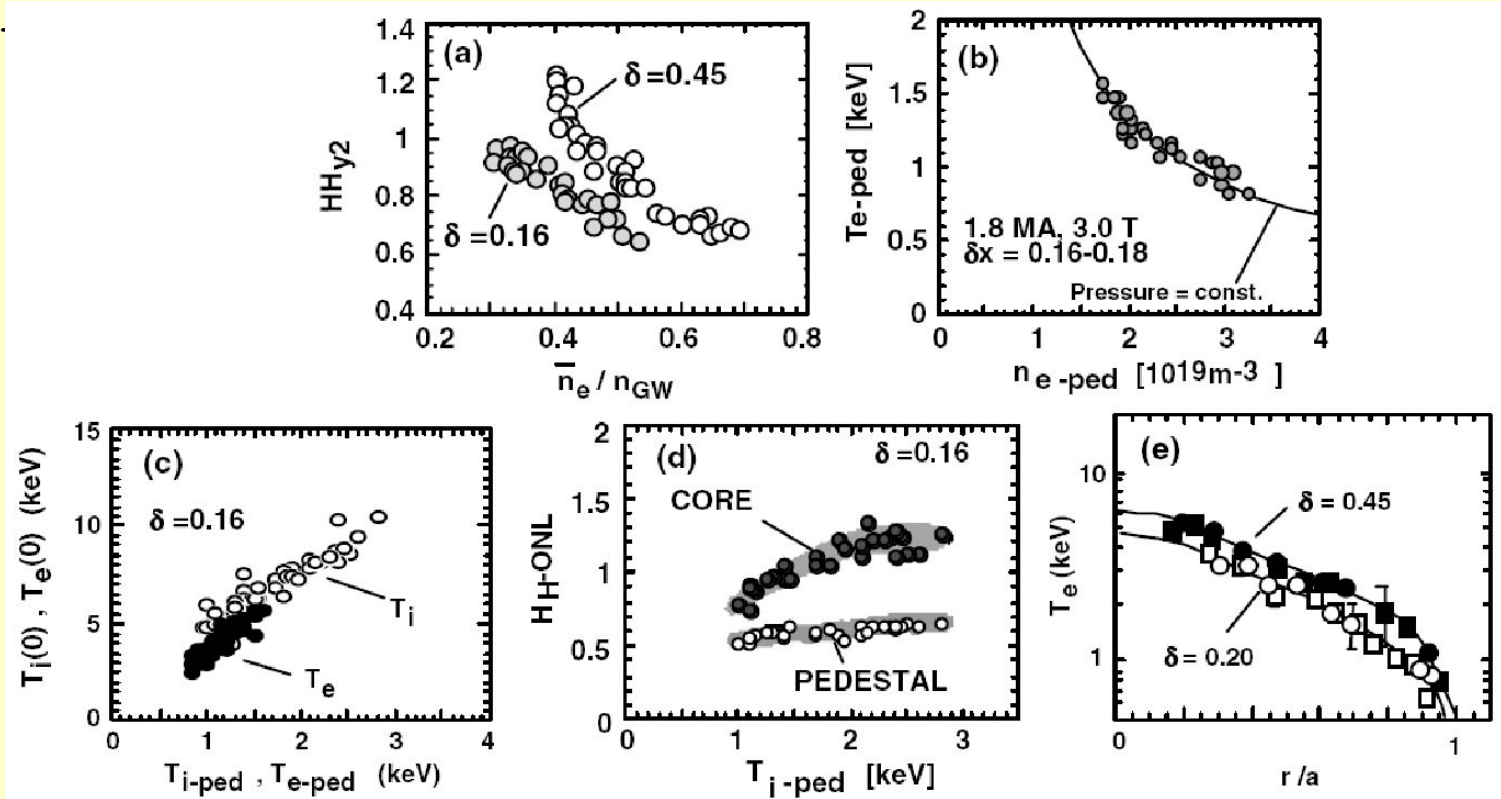


Рис. 54. Type I ELMы H-mode в JT-60U.

- Таким образом, основные факторы определяющие деградацию удержания при больших n_e – это ограничение давления пьедестала ELMs и жесткость профилей
- Несколько методов было обнаружено позволяющие сохранить H-моду с хорошим удержанием при плотностях близких, или даже выше предела Гринвальда:

- 1) увеличение треугольности [Saibene G. *et al* 1999 *Nucl. Fusion* **39** 1133],
- 2) глубокое проникновение пеллетов, сильный газонапуск в экваториальной плоскости комбинированный с интенсивной откачкой дивертора [Mahdavi M.A. *et al* 2002 *Nucl. Fusion* **42** 52],
- 3) небольшой постоянный газовый напуск ведущий к пикированию плотности [Valovic M. *et al* 2002 *Plasma Phys. Control. Fusion* **44** 1911]
- 4) контролируемая инжекция примеси [Ongena J. *et al* 2004 *Nucl. Fusion* **44** 124].

Рассмотрим первые 2 метода

4.1.1. Эффекты влияния формы плазмы на глобальное удержание и удержание в пьедестале

- При большой треугольности, δ , хороший фактор удержания может быть сохранен при большой плотности потому, что улучшается устойчивость по отношению к ELMs [Snyder P.V. and Wilson H.R. 2003 *Plasma Phys. Control. Fusion* **45** 1671].
- При $\uparrow \delta$, граничное давление выше, $T_{e\text{-ped}} \uparrow$ и $T_{\text{core}} \uparrow$ при заданной плотности пьедестала (Рис. 54(e), и, соответственно, $H_{H98(y,2)} \uparrow$ (Рис. 54(a)).
- Рис. 55 иллюстрирует поведение на JET и ASDEX Upgrade при различных фиксированных значениях δ . $H_{H98(y,2)} \downarrow$ с $\uparrow \bar{n}_e / n_G$ при фиксированной δ и \uparrow с δ при фиксированном \bar{n}_e / n_G . При высоких ($\delta = 0.35\text{--}0.45$), $H_{H98(y,2)}$ достигает 1 при $\bar{n}_e / n_G \approx 1.1$ на обеих установках.

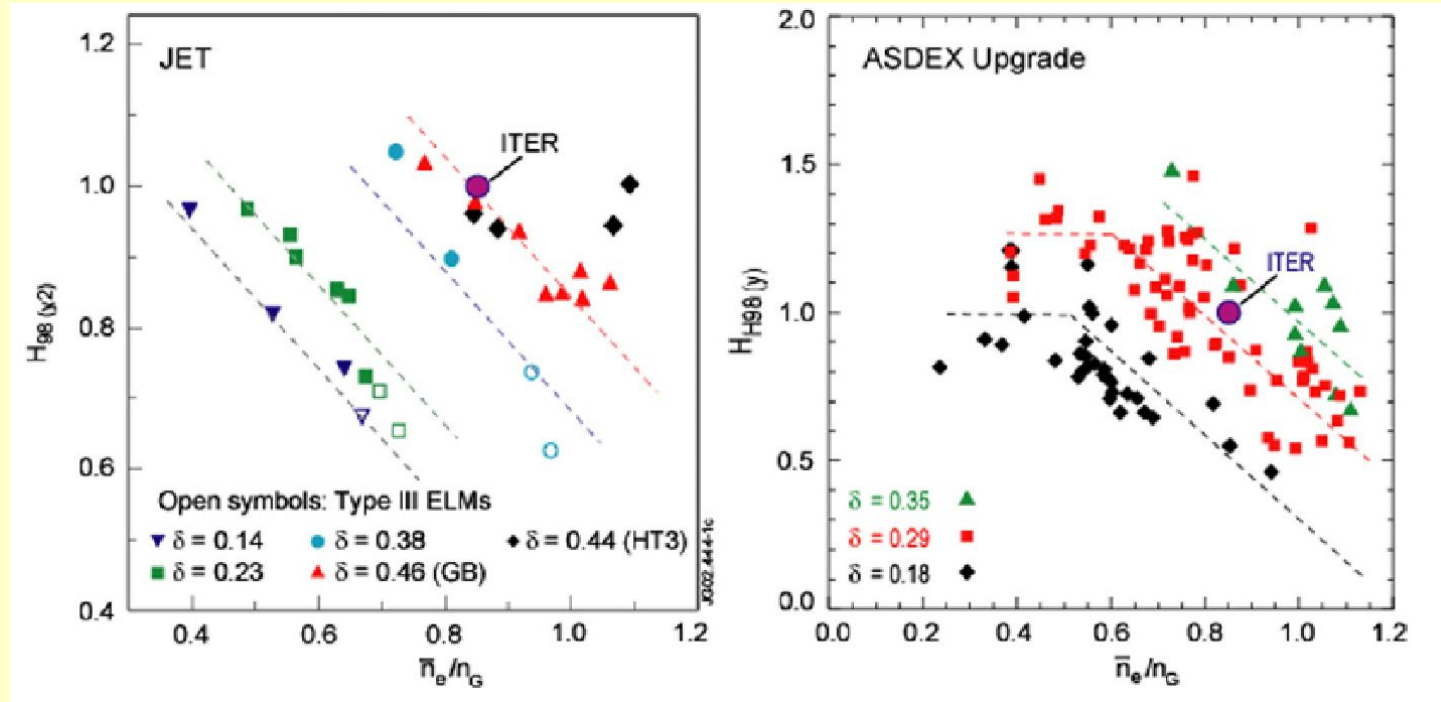


Рис. 55. Фактор $H_{H98(y,2)}$ в H-режиме от \bar{n}_e/n_G для различных δ . (Левый) JET, (Правый) ASDEX Upgrade.

4.1.2. Разряды большой плотности с подпиткой топлива пеллетами

- На Рис. (58), (левый столбец) показан разряд JET демонстрирующий потенциал пеллет-инжекции со стороны сильного поля (high field side (HFS)) для подпитки топливом при большой плотности с одновременным сохранение хорошего удержания в крупной установке [Lang P.T. *et al* 2002 *Plasma Phys. Control. Fusion* 44 1919]. В этом разряде специально подбиралась (менялась) частота инжекции, плотности выше предела Гринвальда достигались с большим фактором пикированности, $n_e(0)/n_{ped} \approx 2$, $H_{H98(y,2)} \approx 0.82$ и $\beta_N \approx 4.8$.

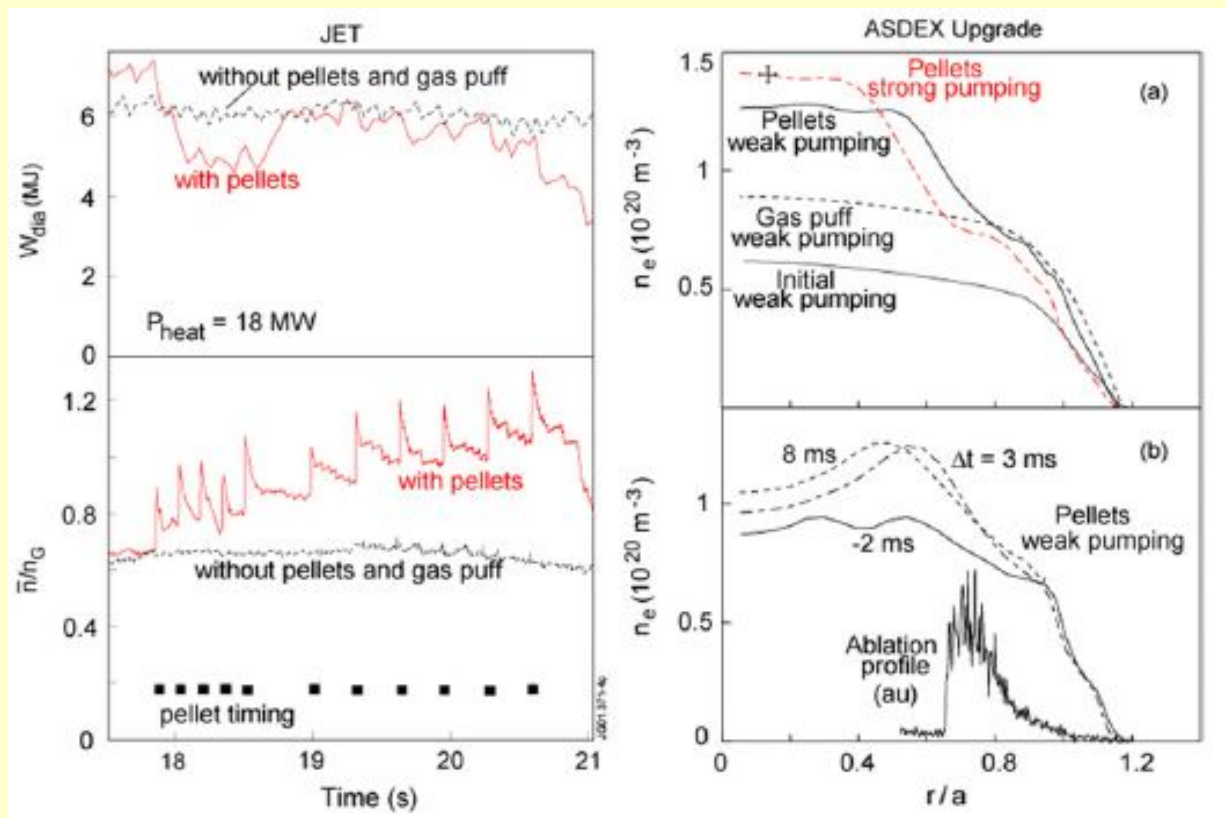


Рис. 58. (Слева) Временной ход n_e/n_G и W_{dia} на JET #53212 с HFS пеллет-инжекцией при $I_p = 2.5$ MA, $B = 2.4$ T, $\delta U/\delta L = 0.34/0.3$ и $\kappa = 1.67$. Пунктир – разряд без пеллет-инжекции. (Справа): (a) профили плотности в ASDEX Upgrade растущие от начального к предельному в H-моде с сильным газонапуском (пунктир) или к стабильной H-моде с превышением плотности Гринвальда путем пеллет-инжекции с турбомолекулярной откачкой (черная сплошная) или криооткачкой (красный пунктир). (b) Профили плотности до и после инжекции и скорость излучения пеллета. Видны плоские при газонапуске и пикированные при пеллет-инжекции профили плотности вблизи предела по плотности H-моды.

4.1.3. Процессы, ограничивающие плотность

- Есть несколько пределов по плотности в токамаках [Greenwald M. 2002 *Plasma Phys. Control. Fusion* **44** R27]. Два из них, H-mode density limit связанный с обратным переходом из H- в L-моду и собственно сам предел по плотности в L-моду приводящий к срыву, наиболее важны для реактора.
- Параметр определяющий предел по плотности в L-моду – плотность Гринвальда,
$$n_G = I_p / \pi a^2 \equiv 1.59 g B_t / (q_{95} R) \quad (n_G [10^{20} \text{ м}^{-3}], I_p [\text{МА}], B_t [\text{Т}], a, R[\text{м}]), \quad (12),$$
где $g = q_{95} / q_{\text{cyl}}$ – фактор формы плазмы с цилиндрическим $q_{\text{cyl}} = 5a^2 B_t / (R I_p)$.
- Обычно, при работе в the Type I ELMу H-mode с газонапуском, увеличение плотности выше некоего значения ведет к переходу от Type I к Type III ELMs сопровождающимся снижением на 15–40% запасенной в плазме тепловой энергии [Sartori R. et al 2002 *Plasma Phys. Control. Fusion* **44** 1801]. Дальнейшее увеличение скорости ввода газа ведет к переходу в L-моду, с полным «отрывом» (detachment) дивертора и/или формированием MARFE в диверторной X-точке [ITER Physics Basis Editors et al 1999 *Nucl. Fusion* **39** 2137]. При еще больших скоростях ввода топлива, случается срыв разряда по пределу плотности в L-моду.
- Для H-моды наиболее известная модель Боррасса (Borass) в которой разобрана модель SOL и определяется максимально допустимая там плотность

$$n_{BLS} = 4.14 \frac{q_{\perp}^{0.094} B_t^{0.53}}{(q_{95} R)^{0.88}} \quad ([10^{20} \text{ м}^{-3}, \text{МВт/м}^2, \text{Т}, \text{м}], \quad (13),$$

где $n_{BLS} = n_{\text{ped}} \approx \bar{n}_e$, $q_{\perp} = (P_{\text{heat}} - P_{\text{totrad}}) / S_{\text{sep}}$, где S_{sep} – площадь сепаратрисы

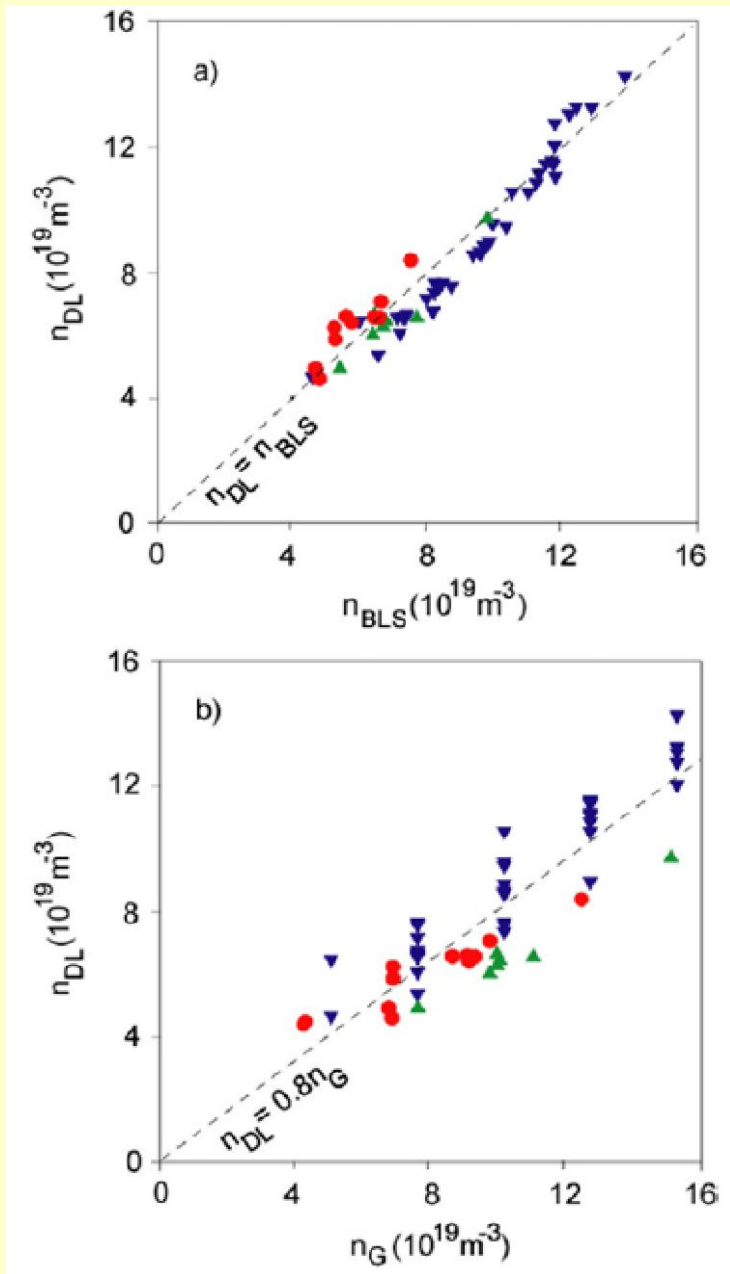


Рис. 59. Сравнение экспериментальных пределов по плотности, n_{DL} , с предсказаниями скейлингов Borrass (a) и Гринвальда (b) для разрядов с газонапуском и пеллет-инжекцией на JET и ASDEX Upgrade. Данные получены на JET (\blacktriangle), диверторная конфигурация gas box (\bullet), и на ASDEX Upgrade Divertor II конфигурации (\blacktriangledown).

- Пределы по плотности для H-mode наблюдаемые в JET и ASDEX Upgrade с газонапуском хорошо согласуются с Borrass скейлингом (Рис. 59(a)) и, в среднем, $\sim 20\%$ ниже скейлинга Гринвальда, хотя некоторые точки близки к n_G (Рис. 59(b)) [509].
- Скейлинг (13) предсказывает относительно небольшой предел плотности в H-mode для ITER, $n_{BLS} (ITER) \approx 0.45n_G$, что прогнозирует трудности в получении требуемой плотности, $n_e \geq 0.85n_G$, с одним только газонапуском.
- Для достижения высокой плотности в центре ITER, кроме газонапуска может потребоваться существенный ввод топлива в центр, к примеру, инжекцией пеллетов.

Содержание лекции №4 «Динамика и перенос в пьедестале»

4.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах

4.2. Структура и характеристики пьедестала

4.3. L-H переходы

4.4. Теория и моделирование переноса в пьедестале

4.5. Моделирование структуры пьедестала

4.6. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения

4.7. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»

4.8. Устойчивость пьедестала

4.9. Возможные сценарии управления пьедесталом

4.10. Выводы по теме «Динамика и перенос в пьедестале»

4.2.1. Важность характеристик пьедестала в H-mode

- ITER будет функционировать вблизи предела по плотности, чтобы достичь максимального термоядерного выхода, $P_{fus} \sim n^2$, а так же для преодоления значения мощности, необходимого для перехода в H-mode, $P_{fus}/P_{LH} \sim n^x$, где $1 < x < 1.4$. Кроме того, как отмечалось ранее, наблюдается улучшение удержания с ростом температуры при постоянной плотности. Таким образом, для максимизации эффективности требуется повышать давление в пьедестале. К сожалению, с ростом давления увеличиваются потери энергии за счёт ELM и вместе с ними нагрузка на дивертор. Приемлемый уровень потерь грубо оценивается 5–10% энергосодержания в пьедестале $W_{ped} = (3/2) \times p_{ped} \times V$. В современных токамаках так и происходит, для ITER может потребоваться подавление Type I ELM или нахождение иного режима функционирования с высоким давлением.

4.2.2. Требования и прогнозирование для ширины транспортного барьера в H-mode.

- Согласно модели peeling–ballooning mode [Snyder P.V. *et al* 2004 *Nucl. Fusion* **44** 320] существует пороговое значение градиента давления в пьедестале при котором начинается развитие ELM. Для достижения необходимой для зажигания температуры пьедестала 2÷4 кэВ при ограниченной величине градиента давления требуется ширина $1\% < \Delta/a < 2.5\%$ барьера относительно малого радиуса.
- В современных получают примерно такие барьеры. Необходимо оценить возможную ширину барьера в ITER. Существуют основные 2 оценки.

- I. Первый скейлинг основан на процессах, которые могут создавать шир скорости. Шир скорости, подавляющий турбулентность в пьедестале, создается $J \times B$ силой, связанной с током, который должен протекать, чтобы компенсировать потерю ионов с пересекающих сепаратрису траекторий. На основе этого представления создан скейлинг, дающий пропорциональность ширины транспортного барьера полоидальному ларморовскому радиусу ионов, $\rho_{pi} = v_{Ti} / \Omega_{pi}$, $\Omega_{pi} = eB_p / m_i$.

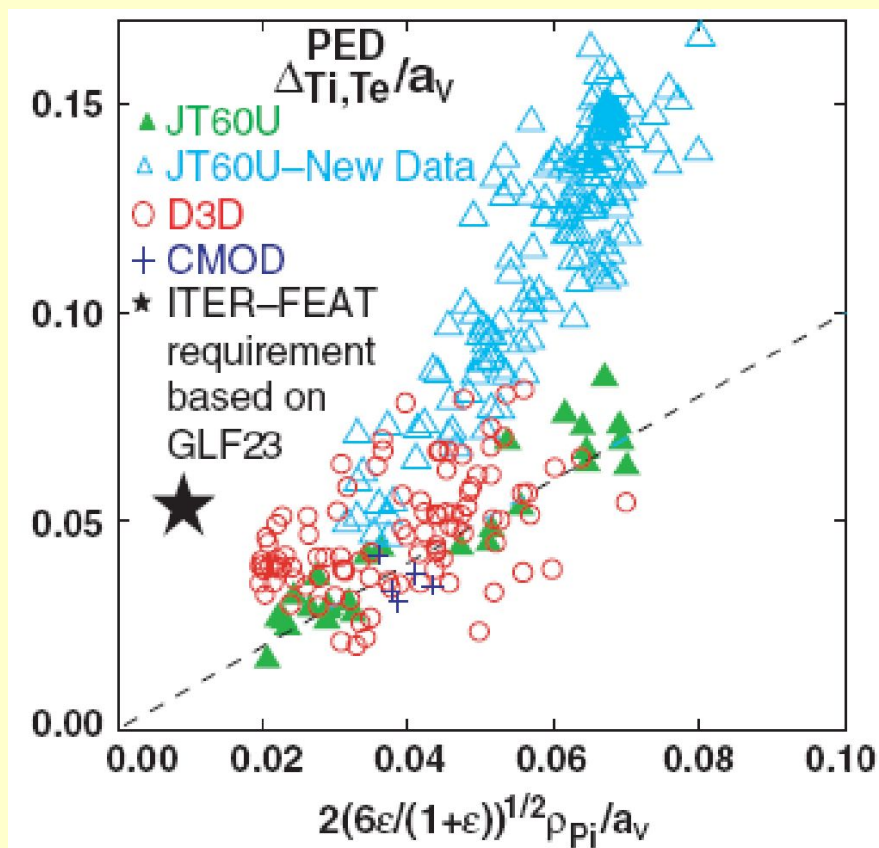
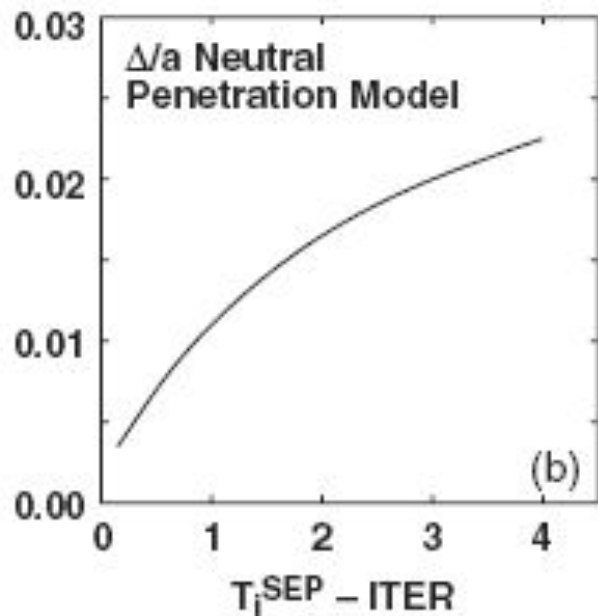
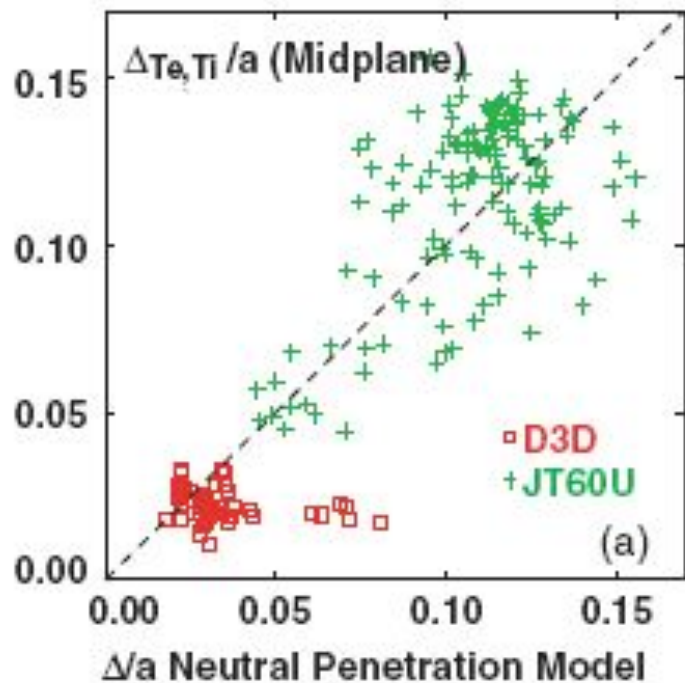


Рис. 60. Нормированная на малый радиус ширина транспортного барьера коррелирует с полоидальным гиро-радиусом ионов ρ_{pi} . Старые данные JT-60U (без ELMs) со слабой треугольностью хорошо согласуются со скейлингом, основанном на подавлении турбулентности радиальным электрическим полем на границе, создаваемым потерей ионов с банановых орбит, пересекающих сепаратрису. Новые данные JT-60U (с ELMs) также растут по скейлингу, меняется коэффициент пропорциональности.



II. Второй подход связан с тем, что $\vec{E} \times \vec{B}$ шир скорости вращения связан с проникновением нейтральных частиц внутрь сепаратрисы, которые меняют радиальный баланс сил. Проникновение нейтралов внутрь сепаратрисы, в свою очередь зависит от температуры ионов на сепаратрисе. Сравнение экспериментальных данных с прогнозируемым по данной модели результатом приведён на Рис. 61.

Рис. 61. (a) Сравнение ширины транспортного барьера в экваториальной плоскости (midplane) и ширины области резкого градиента плотности внутри сепаратрисы от проникновения нейтралов. (b) Предполагаемая ширина транспортного барьера для ITER, как функция от ионной температуры пьедестала. Ширина в 3%, требуемая для стабильности достигается только при очень высоких значениях $T_{\text{ped } i}$. [Osborne T.H. *et al* 2002 *Proc. 19th Int. Conf. on Fusion Energy 2002: (Lyon, 2002)* (Vienna: IAEA) CD-ROM file CT/3 and <http://www.iaea.org/programmes/ripcc/physics/fec2002/html/fec2002.htm>].

- цчAnother approach to determining the barrier width is based on the idea that the inner edge of the barrier is defined by the point at which the velocity shear is sufficient to quench the turbulence [523].
- В итоге, на основе этих подходов был создан несколько скейлингов, учитывающих основные обнаруженные закономерности.

the required pedestal
width for ITER is met.

2÷4 кэВ при ограниченной величине градиента давления требуется ширина 1 %
 $\langle D/a \rangle < 2.5$ % барьера относительно малого радиуса

4.2.3. Скейлинг для давления в пьедестале в H -mode.

- Скейлинг для давления может быть получен напрямую на основе базы данных PDB3V2. Сравнение данных скейлинга с экспериментальными данными представлены на Рис. 63.

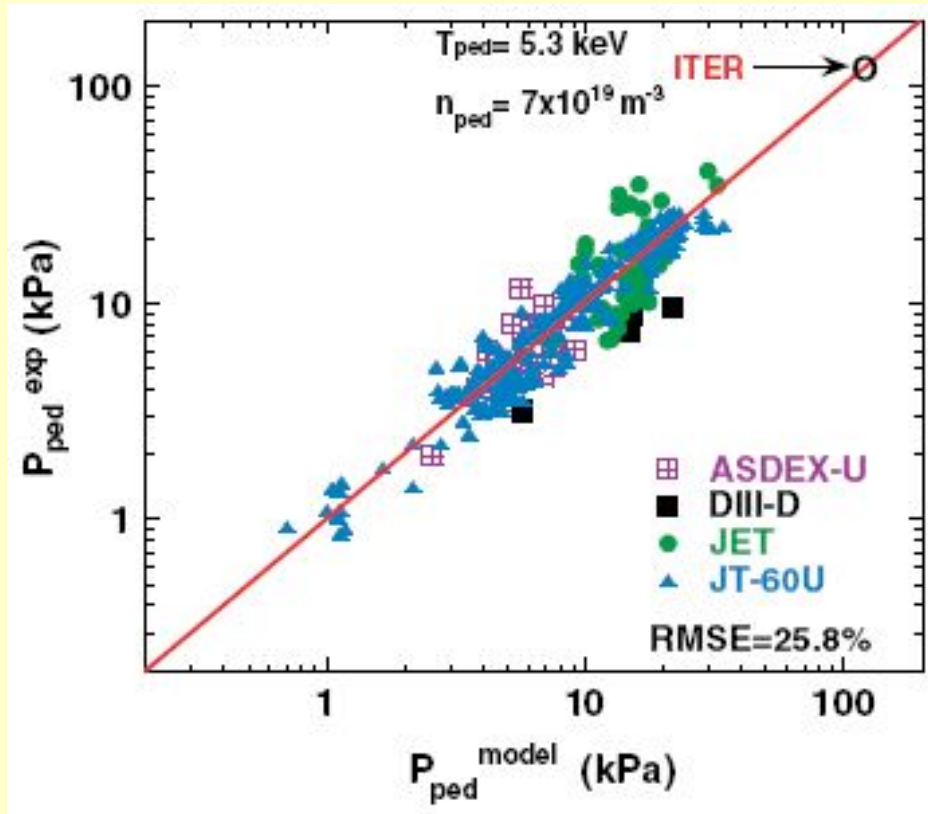


Рис. 63. Сравнение данных PDB3V2 с данными скейлинга. Эта модель предсказывает $T_{ped} = 5.3$ кэВ для ITER при $n_{ped} = 0.7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$. [Sugihara M. *et al* 2003 *Plasma Phys. Control. Fusion* **45** L55].

Содержание лекции №4 «Динамика и перенос в пьедестале»

- 4.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах
- 4.2. Структура и характеристики пьедестала
- 4.3. L-H переходы**
- 4.4. Теория и моделирование переноса в пьедестале
- 4.5. Моделирование структуры пьедестала
- 4.6. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения
- 4.7. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»
- 4.8. Устойчивость пьедестала
- 4.9. Возможные сценарии управления пьедесталом
- 4.10. Выводы по теме «Динамика и перенос в пьедестале»

- В этом разделе приводится ряд экспериментально установленных фактов по переходу разряда из L-mode в H-mode (L-H переход). На основе обширной базы данных создан скейлинг для пороговой мощности

$$P_{LH} = 0.042 \times n_{20}^{0.73} \times B_t^{0.74} \times S^{0.98}, \text{ где } S - \text{площадь сепаратрисы} \quad (26)$$

- Видно, что процессе L-H перехода основные параметры играющие роль - плотность плазмы, магнитное поле и размеры плазмы.
- Последние исследования позволили учесть роль аспектного отношения и эффективного заряда плазмы при оценке пороговой мощности.

$$P_{LH} = 0.072 \times n_{20}^{0.7} \times B_t^{0.7} \times S^{0.9} \times (Z_{eff}/2)^{0.7} \times F(A)^\gamma \quad (27)$$

- Здесь $F(A) = 0.1 \times A/f(A)$, $f(A) = 1 - [2/(1+A)]^{0.5}$, $\gamma = 0.5$. Используя это выражение с $Z_{eff} = 2$, пороговая мощность для ITER оценивается в 40-50 МВт, что реализуемо.

Содержание лекции №4 «Динамика и перенос в пьедестале»

- 4.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах
- 4.2. Структура и характеристики пьедестала
- 4.3. L-H переходы
- 4.4. Теория и моделирование переноса в пьедестале**
- 4.5. Моделирование структуры пьедестала
- 4.6. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения
- 4.7. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»
- 4.8. Устойчивость пьедестала
- 4.9. Возможные сценарии управления пьедесталом
- 4.10. Выводы по теме «Динамика и перенос в пьедестале»

- Среди всех теорий (см. обзор [Connor J.W. and Wilson H.R. 2000 *Plasma Phys. Control.Fusion* **42** R1]) экспериментальное подтверждение получили те, в основе которых лежит гипотеза о подавлении турбулентности электрическим полем с широм. Тем не менее, механизм генерации этого поля и механизм запуска остаются неясными. В разных условиях могут быть разные механизмы и не существует единой теории описывающей весь спектр наблюдаемых явлений.
- В подавлении турбулентности кроме основных потоков могут участвовать ещё и зональные потоки, которые генерируются турбулентностью. Они, как бы, забирают часть энергии у турбулентности, распределяя её в осесимметричных модах, которые не оказывают влияние на радиальный перенос. Учёт зональных потоков приводит к снижению порога L-H перехода.

Еще пример модели – модель граничной турбулентности BOUT (for BOUNdary Turbulence) [Xu X.Q. *et al* 2000 *Phys. Plasmas* 7 1951]. Моделирование предполагает следующий сценарий осуществления перехода: когда плазма греется в центре ионная и электронная температура на границе внутренней и внешней областей увеличиваются и характерный масштаб их градиентов уменьшается. Резкий профиль давления вызывает сильные неустойчивости и турбулентность, что приводит к большому переносу поперёк поля. Сильная турбулентность так же создаёт сильный поток $\vec{E} \times \vec{B}$ с градиентом скорости из-за Reynolds stress (represent the transfer of momentum due to turbulent fluctuations). Однако, поскольку профиль давления становится круче, поток шири $\vec{E} \times \vec{B}$ с градиентом скорости достигает уровня, необходимого для подавления турбулентности. После перехода поток поддерживается крутым градиентом давления и плазма остаётся в H-mode.

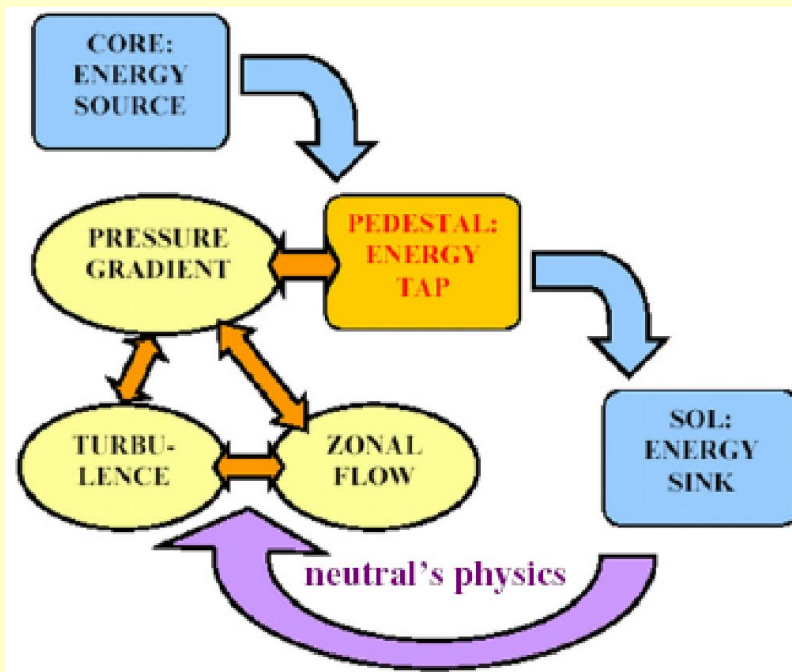


Рис. 65. Набросок физики L–H перехода: зона пьедестала играет роль крана для потока энергии из центральной области в SOL плазмы. Так содержание энергии в центре определяется физикой пьедестала на границе, которая включает в себя самосогласованную генерацию турбулентных потоков порождаемую градиентом давления и подверженную сильному влиянию физике нейтралов и переноса в SOL.

Содержание лекции №4 «Динамика и перенос в пьедестале»

- 4.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах
- 4.2. Структура и характеристики пьедестала
- 4.3. L-H переходы
- 4.4. Теория и моделирование переноса в пьедестале
- 4.5. Моделирование структуры пьедестала**
- 4.6. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения
- 4.7. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»
- 4.8. Устойчивость пьедестала
- 4.9. Возможные сценарии управления пьедесталом
- 4.10. Выводы по теме «Динамика и перенос в пьедестале»

- Основная цель моделирования структуры пьедестала понять и предсказать изменение во времени его ширины и высоты для температуры и концентрации плазмы. Так же она может пониматься как граничные условия для внутренней и внешней областей плазмы. Но на параметры пьедестала оказывают влияние как внешние так и внутренние области плазмы, так что моделирование пьедестала требует интеграции с моделированием центра и внешней области. Пока при моделировании на сепаратрисе ставятся граничные условия по результатам моделирования SOL/divertor кодов.
- Одной из главных сложностей моделирования является наличие процессов с существенно разными временными масштабами от времени переноса до быстрых МГД процессов.
- Большинство кодов основано на транспортном коде с дополнительным описанием турбулентного переноса и переноса за счёт МГД процессов.
- МГД процессы могут моделироваться, а могут оцениваться градиент давления и сравниваться с критическим значением, определяемым по простой аналитической формуле.
- Могут меняться закладываемые в код особенности механизма подавления турбулентности и влияния нейтралов.
- Основные параметры различных моделей сведены в Таблице 2.

	Code				
Model	ICPS [516, 566]	JETTO [567] EDGE2D NIMBUS	LEHIGH [568] (BALDUR, JETTO, ASTRA together with HELENA and MISHKA)	DOUT-UEEDGE [569]	XPTOR [533]
1. Transport models for turbulent plasma	Originally; modified IFSPPPT model for ions and modified RLW transport for electrons Updated to modified multi-mode model (MMM95 [236, 238, 239])	Bohm/gyro-Bohm Weiland MMM95	MMM95 [236, 238, 239] GLF23 [20] Mixed Bohm /gyro-Bohm	Self-consistent turbulent fluxes from 3D resistive ballooning modes, including X-point and LM effects	GLF23 [20] has been used to model the ion particle, electron and ion thermal, and momentum transport within the pedestal region
2. Mechanisms of turbulence suppression in pedestal region	$E \times B$ + magnetic shear for growth rate	$E \times B$ + magnetic shear or simply magnetic shear	$E \times B$ shear	$E \times B$ and magnetic shear included in turbulence	$E \times B$ shear + magnetic shear + Shafranov shift stabilization NCLASS
3. Transport model in the pedestal region after suppression of turbulent transport	Neoclassical	Local neoclassical (NCLASS) + fraction of anomalous or non-local neoclassical on the top of barrier	NCLASS + residual anomalous transport used in ASTRA code Ion thermal neoclassical transport at top of pedestal used throughout pedestal in JETTO	Residual turbulence + estimate from simple neoclassical expression	
4. Model for pedestal width	Self-consistently determined with transport suppression model	Fixed or given by formulae	Self-consistently (ASTRA) Fixed or given by formulae (JETTO) Models for pedestal width in [72] (BALDUR)	Edge profile evolved self-consistently from fluid neutral model source and residual turbulence	Self-consistently determined with transport suppression model
5. Model for critical pressure gradient and ELM trigger	Analytical formula for ideal ballooning mode	Ballooning criteria for α_{ent} or analytical peeling criteria for current MISHKA is used routinely to check the validity of analytical criteria	Ballooning criteria for α_{ent} or analytical peeling criteria for current (JETTO, ASTRA) Whichever mode becomes unstable first causes the ELM crash	Pressure and current terms (ballooning/peeling) that drive ELMs are in the simulation equations, similar to ELITE	MHD constraints not presently employed Transport is assumed to be electrostatic within GLF23

6. Model for transport during ELM cycle	Not explicitly treated Time averaged pedestal structure is calculated	Gaussian shape for χ_1 with width from MISHKA Amplitude and duration can be prescribed or taken from a solution of corresponding time evolving equation	Dynamic model for ELMs (JETTO, ASTRA) Each ELM crash produces a rapid change in the edge profiles for T_e , n , and j , followed by a rebuilding of the pedestal	ELM crash and full ELM cycle under development	Presently not being treated
7. Model for MHD 'equilibrium' during ELM	Not solved			ELM crash and full ELM cycle under development	Presently not treated
8. Model for particle transport	$0.1(\chi_e + \chi_i)$ and Ware pinch	Bohm/gyro-Bohm Weiland and MMM (including off-diagonal elements) Ware pinch NCLASS pinches		Self-consistent from fluid turbulence	GI F23 + NCLASS for ions Electron density from quasi neutrality using predicted main ion profile along with experimental impurity and fast ion density profiles Particle source taken from experimental analysis (TRANSP or ONETWO)
9. Model for neutrals	Astra routine based on Dnestrovski and Kostomarov For ITER, direct core fuelling with profile calculated from simple NBI model (without energy input), results insensitive to penetration depth for penetration inside pedestal radius	Diffusive equation for neutrals in JETTO (FRANTIC) Monte Carlo for EDGE2D (NIMRUN)	Monte Carlo (JETTO, BALDUR)	Various models including fluid, analytic or Monte Carlo (seldom used and not yet with turbulence -transport coupling)	
10. Boundary condition for separatrix values	Scaling relations calculated by B2-EIRENE	Density and temperature at the separatrix are usually prescribed, sometimes taken from EDGE2D	Prescribed (JETTO, ASTRA) Boundary taken at top of pedestal from pedestal model (BALDUR)	Extends from pedestal to wall, thus including separatrix	Boundary conditions enforced inside separatrix location using experimental values

Содержание лекции №4 «Динамика и перенос в пьедестале»

4.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах

4.2. Структура и характеристики пьедестала

4.3. L-H переходы

4.4. Теория и моделирование переноса в пьедестале

4.5. Моделирование структуры пьедестала

4.6. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения

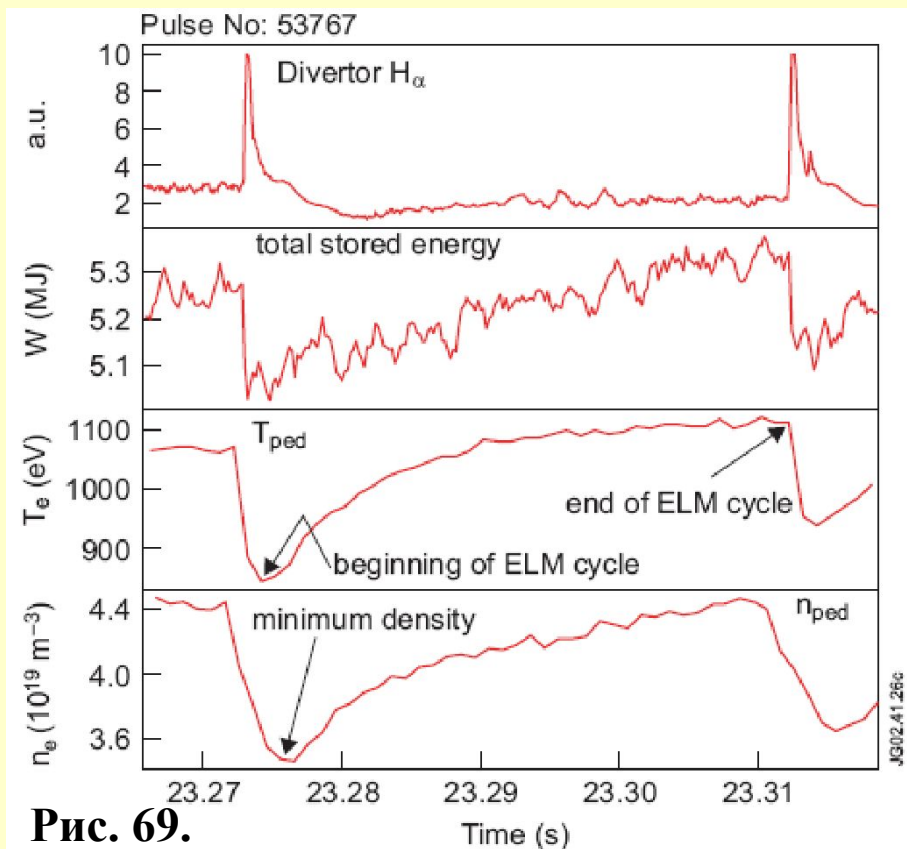
4.7. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»

4.8. Устойчивость пьедестала

4.9. Возможные сценарии управления пьедесталом

4.10. Выводы по теме «Динамика и перенос в пьедестале»

- Type I ELMs – спонтанно возникающие периодические релаксации пьедестала в H-mode плазме, при приложении мощности в $\sim 1.5\text{--}2$ раз больше пороговой мощности, необходимой для L–H перехода [Sartori R. *et al* 1998 *Plasma Phys. Control. Fusion* **40** 757]. Type I ELMs характеристики одинаковы во всех токамаках.
- При мощностях сравнимых с пороговой для L–H перехода мощностью или при большой плотности разряда, Type I ELMs заменяется на Type III ELMs (более частых и менее энергоемких).



4.6.1. ELM цикл — рост и коллапс пьедестала.

- Рис. 69 показывает временную эволюцию D_α излучения дивертора, запасенную энергию плазмы, температуру и плотность пьедестала в JET Type I ELMу H-моде.
- После коллапса пьедестала, n_e и T_e растут снова до нового ELM. ELM срыв случается очень быстро $100\text{--}300 \mu\text{s}$ и это время мало меняется от параметров плазмы и токамака.

- После срыва, восстановление верха пьедестала более долгое, сопровождающееся перестройкой профилей в пьедестале. ELM срыв вызывает уширение профилей, которые затем пикируются до наступления следующего ELM.
- ELM срыв сначала происходит со стороны слабого магнитного поля токамака, затем возмущение плотности распространяется на внутреннюю сторону приблизительно со скоростью ионного звука, что согласуется с МГД интерпретацией ELM событий как неустойчивости баллонного типа.
- Выяснено, что потери энергии в ELM происходят в основном за счет конвективного переноса (filaments or blobs).

4.6.2. Техники смягчения (mitigation) Type I ELM.

- Время жизни диверторных пластин в ITER за счет эрозии и сублимации во время Type I ELMs значительно снижается. Поэтому развиваются техники сохранения свойств общего переноса плазмы и уменьшения загрузки ELM-мами диверторных элементов.
- Внешние возмущения – управление пограничным током, пограничным магнитным полем (Рис. 71) и индицирование ELM небольшими пеллетами (Будет обсуждено в последующих лекциях) – придумано на данный момент и обсуждены здесь, а в следующем параграфе 4.7. обсуждены режимы плазмы без Type I ELMs.
- Важно эту работу распространить на токамаки с широким изменением параметров плазмы, а также продемонстрировать совместимость этих техник с MHD устойчивостью плазмы.

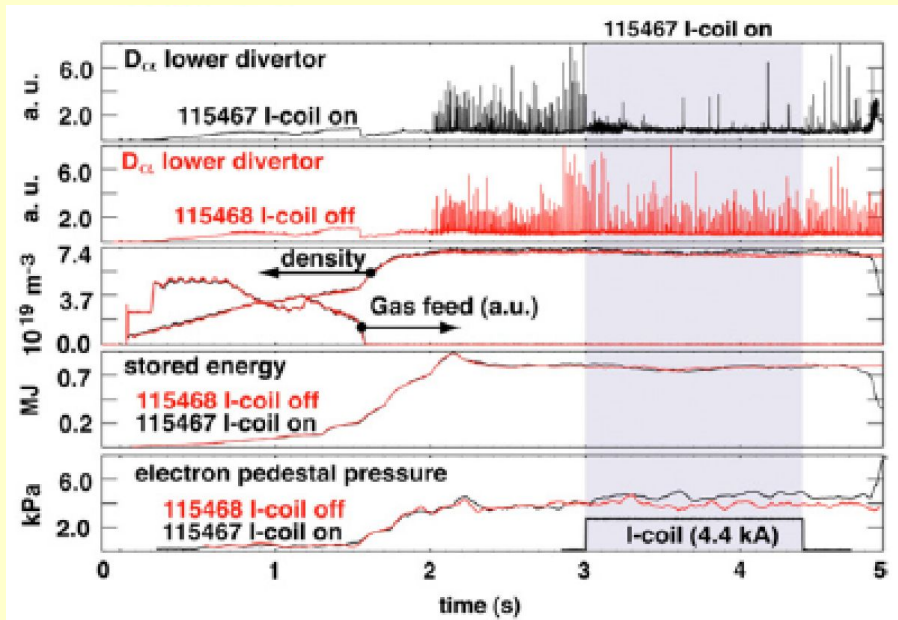


Рис.71. Пример подавления Type I ELM приложением граничного резонансного магнитного возмущения посредством ‘Icoils’ в DIII-D: сравнение разряда № 115468 (Icoils выкл., черные) и №115467 (Icoils вкл., красные). Сверху вниз: D_α на нижнем диверторе для Icoils выкл. (1 рис.) и вкл. (2 рис.); плотности плазм и газонапуск (3 рис.); W (4 рис.) и P_{e-ped} (5 рис.). Серая тень когда включены ‘Icoils’ в разряде № 115467.

Содержание лекции №4 «Динамика и перенос в пьедестале»

- 4.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах
- 4.2. Структура и характеристики пьедестала
- 4.3. L-H переходы
- 4.4. Теория и моделирование переноса в пьедестале
- 4.5. Моделирование структуры пьедестала
- 4.6. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения
- 4.7. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»**
- 4.8. Устойчивость пьедестала
- 4.9. Возможные сценарии управления пьедесталом
- 4.10. Выводы по теме «Динамика и перенос в пьедестале»

4.7. Альтернативы режиму Type I ELMы H-mode

- H-моды with Type I ELMs наиболее часто реализуемые и относительно хорошо изученные режимы улучшенного удержания в современных токамаках. Именно он выбран как базовый сценарий для ИТЭР
- Они, однако, сокращают время жизни диверторных пластин и могут сорвать или прекратить ИТВ через МГД процессы в центре, связанные с модификацией периферийных профилей [Becoulet M. *et al* 2003 *Plasma Phys. Control. Fusion* **45** A93, Polevoi A.R. *et al* 2003 *Nucl. Fusion* **43** 1072, Turnbull A.D. *et al* 2003 *Plasma Phys. Control. Fusion* **45** 1845].
- Было понято, что нужен механизм для увеличения переноса частиц на границе плазмы с H-модой, иначе частицы и примеси имеют тенденцию к аккумулярованию.
- Чтобы исключить эти потенциальные опасности изучают новые режимы, в которых удержание хорошее, примесь не аккумуляруется и при этом нет совсем или есть маленькие ELMs или непрерывные флуктуации на периферии.

4.7.1. Type III ELMs.

- Type III ELMы H-modes по сравнению с Type I ELMы режимом, имеют выше ELM частоту, меньше потерь энергии на 1 ELM, W_{ELM} , но зато сниженное 10–30% время удержание энергии.
- В отличии от Type I ELMs, Type III ELMs часто наблюдаются в плазмах с ИТВ, что делает их, в принципе, интересными для будущих приложений

4.7.2. *Enhanced D-alpha and similar regimes.*

- ‘Enhanced $D\alpha$ ’ (EDA) H-mode режим впервые увиден на Alcator C-Mod в 1996. Глобальное удержание как и в Type I ELMу режиме, $H_{ITER89P}$ значениями до 2, в то время как плотность и излучающаяся мощность стационарны по сравнению с обычно свободной от ELM H-модой. Они получаются при $q_{95} > 3.5$ и $\delta > 0.35$ и отличаются ELM-free по столкновительности и градиенту давления в периферийной области.

4.7.3. *‘Quiescent’ H-mode.*

- Спокойная ‘quiescent H-mode’ (QH режим) впервые обнаружен на DIII-D в 1999 и потом воспроизведен на ASDEX Upgrade. Подобно EDA режиму, он демонстрирует хорошее удержание, похожее на тот что в Type I ELMу режиме, и имеет достаточный перенос частиц, чтобы остановить аккумуляцию частиц и примесей.

4.7.4. *Type II ELMs.*

- Первый переход от Type I ELMs к малым ELMs с хорошим удержанием плазмы был обнаружен DIII-D в 1990 в single-null разряде с повышением вытянутости и треугольности плазмы и малым током ($\kappa = 1.8$, $\delta \sim 0.5$, $q_{95} \sim 7$), и объяснялся изменением МГД устойчивости на границе плазмы. Особенность режима – совместное сосуществование большого давления пьедестала и иррегулярных с высокой частотой очень маленьких ELMs.

4.7.5. *‘Grassy’ ELMs.*

- Небольшие ELMs с хорошим удержанием плазмы были достигнуты на JT-60U с высокой треугольностью, β_p и слабым обратным широм (т.е. в плазмах имеющих как ITB так и ETB).

Содержание лекции №4 «Динамика и перенос в пьедестале»

- 4.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах
- 4.2. Структура и характеристики пьедестала
- 4.3. L-H переходы
- 4.4. Теория и моделирование переноса в пьедестале
- 4.5. Моделирование структуры пьедестала
- 4.6. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения
- 4.7. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»
- 4.8. Устойчивость пьедестала**
- 4.9. Возможные сценарии управления пьедесталом
- 4.10. Выводы по теме «Динамика и перенос в пьедестале»

4.8.1. МГД неустойчивости в пьедестале

- Есть 2 идеальные МГД неустойчивости связанные с пьедесталом. Баллонные моды с большим тороидальным числом моды, n , могут быть неустойчиво если градиент давления превышает определенное критическое значение. Однако, достаточным управлением формой шнура и в присутствии достаточной плотности тока, эти баллонные моды могут стабилизироваться, обеспечивая доступ к более высоким значения градиента давления, к так называемой второй зоне стабильности. Дестабилизирующий эффект градиента давления возникает вследствие того факта, что мода локализована на внешнем обводе тора с неблагоприятной кривизной магнитного поля.
- Вторая идеальная МГД неустойчивость – пиллинг-мода (the peeling mode), которая как думают есть локализованная на границе кинк-мода [Manickam J. 1992 *Phys. Fluids B* 4 1901]. Источником неустойчивости является плотность тока (или ее градиент) в области пьедестала. Увеличивая треугольность и вытянутость, можно регулировать плотность тока для стабилизации моды.
- Когда оба дестабилизирующих источника для 2 МГД неустойчивостей имеются в наличии, обычно при промежуточных значениях $n \sim 6-12$, моды известны как связанные пиллинг-баллонные моды the (coupled) peeling–ballooning modes [Snyder R.V. et al 2002 *Phys. Plasmas* 9 2037].
- Развита несколько кодов для расчета МГД устойчивости в пьедестале. Пример приведен на Рис. 81.

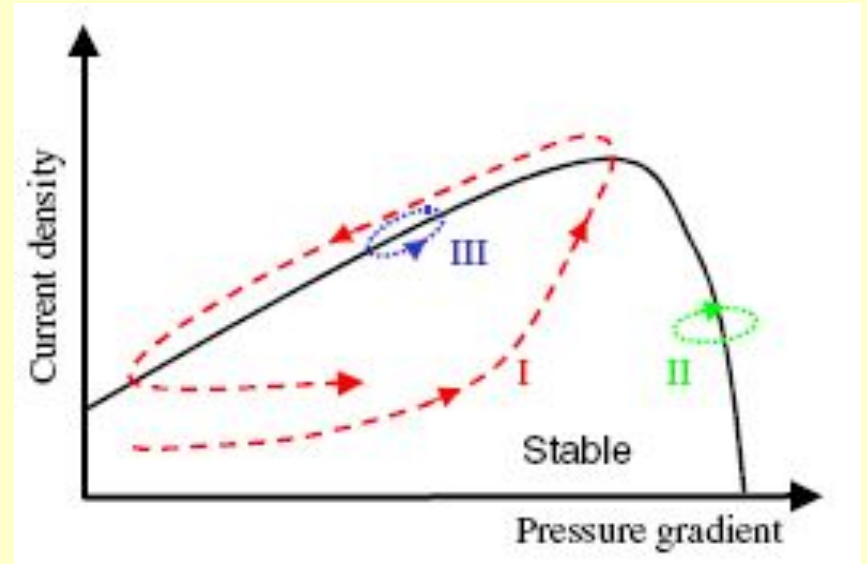
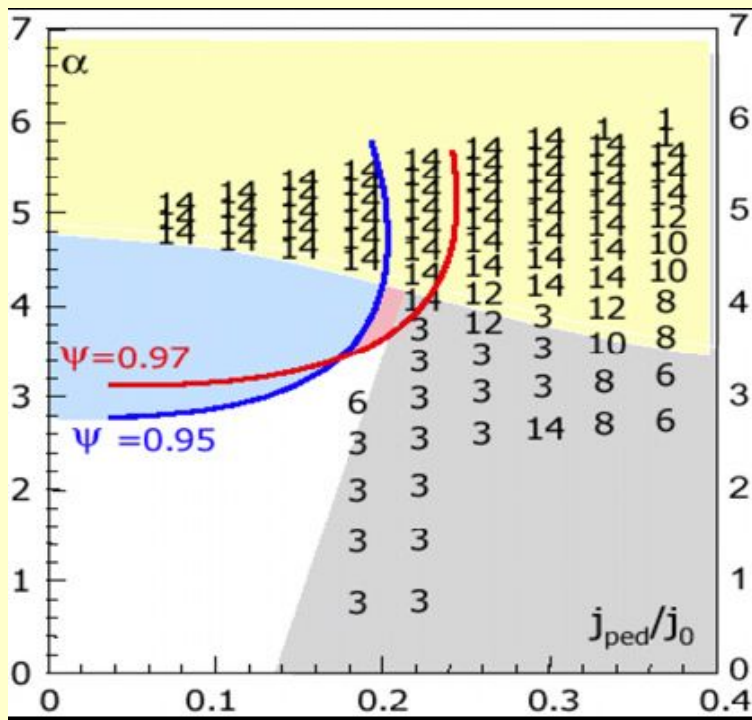


Рис. 81. (a) Вычисления стабильности для разряда JET с использованием кода MISHKA [Mikhailovskii A.V. *et al* 1997 *Plasma Phys. Rep.* **23** 844]. Закрашенные области неустойчивы, числа показывают наиболее неустойчивое торoidalное число моды, две кривые показывают $n=\infty$ границу баллонной устойчивости на 2 магнитных поверхностях, α – нормализованный градиент давления, j_{ped}/j_0 – плотности тока в пьедестале и в центре плазмы. Серая зона – пиллинг (кинк) неустойчивая область. Не закрашенная область устойчива, (b) Примерный рисунок пограничной кривой стабильности (the marginal stability curve (сплошная кривая), вместе с возможными интерпретациями больших (I) и малых (II и III) ELM циклов [Connor J.W. *et al* 1998 *Phys. Plasmas* **5** 2687, Snyder P.V. *et al* 2002 *Phys. Plasmas* **9** 2037].

- Нелинейная теория ELMs предсказывает, что мода возникает в трубке потока (flux tube), которая сужается и вращается что позволяет ей извергаться в SOL без перезамыкания (reconnection) [Wilson H.R. and Cowley S.C. 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 175006]. Прямое экспериментальное подтверждение такой картины получено недавно на токамаке MAST (Рис. 87).



Рис. 87. Волокнистые (Filamentary) структуры наблюдаемые на MAST во время ELM.

4.8.2. Следствия для ИТЭР

- К сожалению нет количественной модели для размера ELM. Есть экспериментальные предсказания, что ELM размер уменьшается в разрядах с более высокой треугольностью и значениями q_{95} .
- Связаны ли филаменты с центральной областью пока не ясно, но если связаны, это они опасны при выбрасывании на стенки камеры и в дивертор.
- Более количественно можно предсказать максимальное давление в пьедестале ИТЭР.

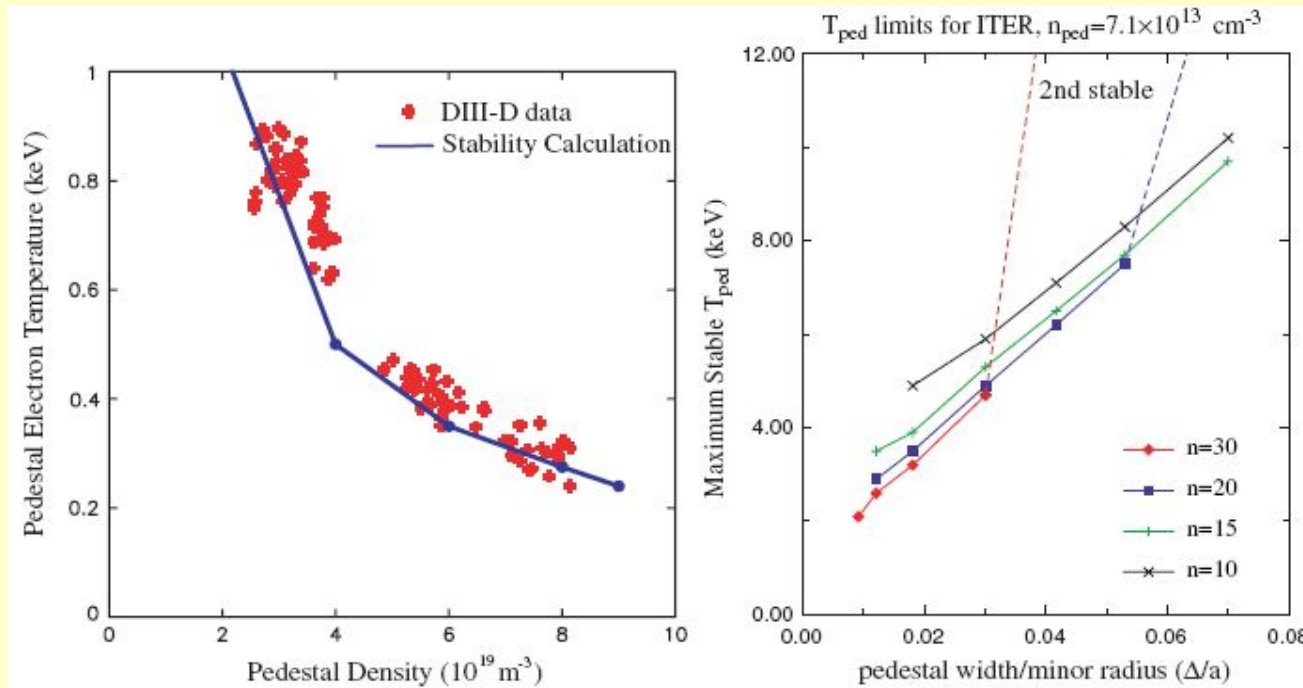


Рис. 88. Сравнение T_{ped} от n_{ped} для Type I ELMу H-mode DIII-D и вычислений (слева). Справа предсказания T_{ped} от ширины пьедестала для ИТЭР из идеальных МГД вычислений с различными n .

Содержание лекции №4 «Динамика и перенос в пьедестале»

- 4.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах
- 4.2. Структура и характеристики пьедестала
- 4.3. L-H переходы
- 4.4. Теория и моделирование переноса в пьедестале
- 4.5. Моделирование структуры пьедестала
- 4.6. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения
- 4.7. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»
- 4.8. Устойчивость пьедестала
- 4.9. Возможные сценарии управления пьедесталом**
- 4.10. Выводы по теме «Динамика и перенос в пьедестале»

- При управлении пьедесталом ('pedestal control'), т.е. управлении структурой/профилями параметров пьедестала и активностью ELM, возможные подходы основываются на модификации переноса, распределения нейтралов и МГД устойчивости

4.9.1. Управление высотой и структурой пьедестала

- С целью максимизировать параметр Q_{DT} , согласно современным знаниям, первым шагом надо добиться равновесия с большими значениями вытянутости и треугольности. Мощности для нагрева и поддержания тока нужно прикладывать к центральным областям (не к области пьедестала) также для максимизации Q_{DT} .
- Что касается ввода топлива, пеллет-инжекция кажется благоприятным методом для хорошего удержания при большой плотности, так как снижает число нейтралов окружающих плазму и минимизирует рециркуляцию топлива.
- Небольшой газонапуск в диверторной области может потребоваться для поддержания условия «отрыва» этой зоны от центра (detached condition).
- Откачка с внутренней точки соединения диверторной пластины с плазмой (the inner strike point) будет оптимизироваться для получения требуемой треугольности

4.9.2. Управление ELM

- В ИТЭР, управление в реальном времени сценарием ELM необходимо для смягчения их последствий (снижение тепловых нагрузок на дивертор и совместимость с ИТВ), управления примесями и топливом при этом сохраняя W_{ped} для обеспечения горения плазмы. Два способа контроля ELM видны. Первый – это перевод ELM больших в маленькие, второй увеличить другие каналы потерь.

Пеллет -инжекция

- В ASDEX Upgrade, частота Type I ELM управлялась ($f_{ELM}/f_{pel} = 1$) посредством инъекции маленьких водородных пеллетов в виде кубиков $(1.4 \text{ mm})^3 \cdot 10^{19}$ D-atoms, при скорости 1 км/сек) как показано на Рис. 89.

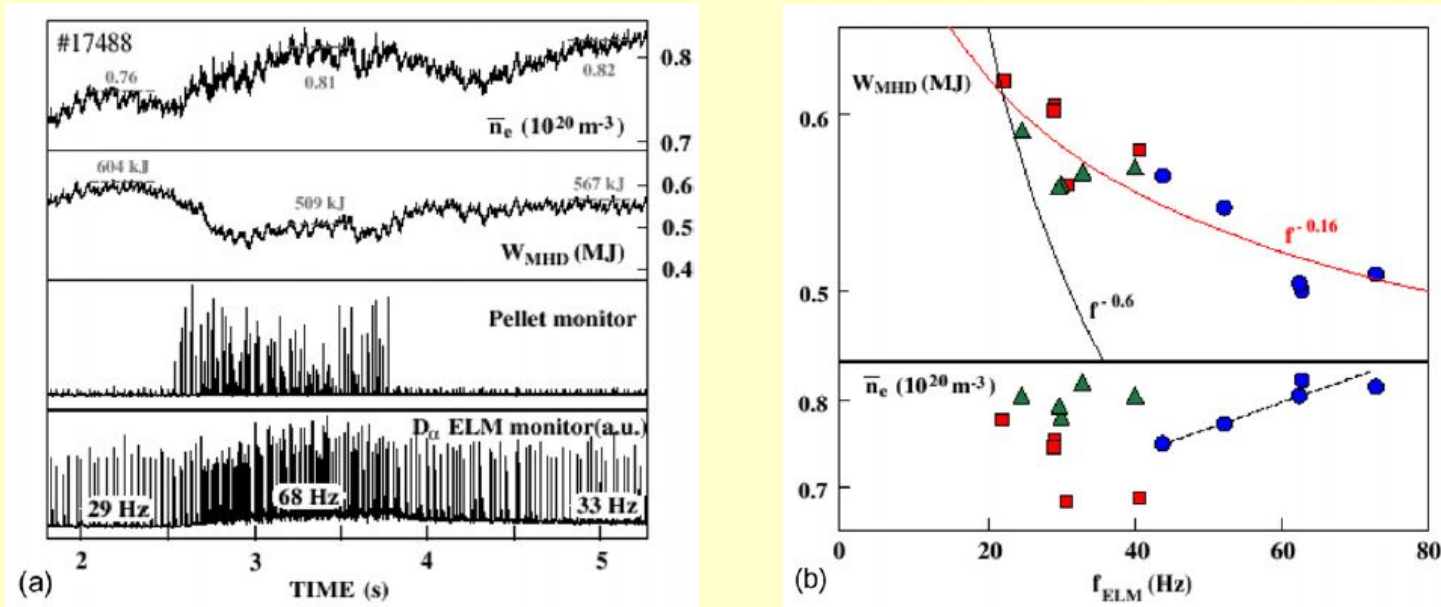


Рис. 89. Управление ELM пеллет-инжекцией в ASDEX Upgrade: (a) плотность, диамагнитная энергия, пеллетный монитор и D_{α} сигналы в течении газонапуска без пеллетов ($f_{ELM} = 29$ Гц), малых пеллетов и отсутствия газонапуска ($f_{ELM} = 68$ Гц) и с внешним газонапуском только ($f_{ELM} = 68$ Гц). (b): диамагнитная энергия с среднехордовая плотность от частоты ELM без газа (квадраты), с газонапуском (треугольники) и пеллетные фазы (круги). С пеллетами: $W_{MHD} \sim f_{ELM}^{-0.16}$. С газонапуском: $W_{MHD} \sim f_{ELM}^{-0.6}$.

Контроль граничного тока

- Изменение периферийного тока может модифицировать условия устойчивости и характеристики ELM как это предсказывается теорией the peeling–ballooning mode. На токамаке COMPASS-D, Type I ELMs триггерировались когда ток пограничный увеличивался. В TCV, с использованием генерации положительного (вверх для LSN) тока при вертикальном смещении плазмы, ELMs триггерировались также. Для приложения к ИТЭР такого способа, надо оценить эффекты ограниченных возможностей подвода мощности локально на периферию для создания дополнительного тока.

Применение внешнего поля

- В JFT-2M, ELM-free H-mode делалась попытка ее перевода в стационарную ELMу H-mode путем прикладывания эргодического магнитного поля [Miura Y. *et al* 1991 *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Washington, D.C., 1990)* (Vienna: IAEA) vol 1 p 325]. Обнаружено, что компонента винтового поля с $n = 4$ эффективна для инициирования ELMs [687]. COMPASS-D также демонстрировал такой переход прикладывая радиальное магнитное возмущение на периферии плазмы. С другой стороны, на DIII-D [Evans T.E. *et al* 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 235003], Type I ELMs подавлялись почти полностью с внешними винтовыми магнитными возмущениями (в основном с $n = 3$ гармоникой при $q_{95} = 3-4$), при этом сохраняя свойства удержания плазмы. Для того, чтобы схему пограничной эргодизации применить к ИТЭР, необходимо изучение влияния такого способа на пьедестал, а также на стабильность low- n global mode при высоких бета.

Управление пограничным вращением

- Вращение против тока генерирует переход в QH-mode. Использование со-, counter- and perpendicular NBI, JT-60U продемонстрировал, что the Type I ELM частота увеличивается с ростом тороидальной скорости вращения по току, и ELMs изменяются от Type I к «grassy», практически сохраняя давление пьедестала (Рис. 90)

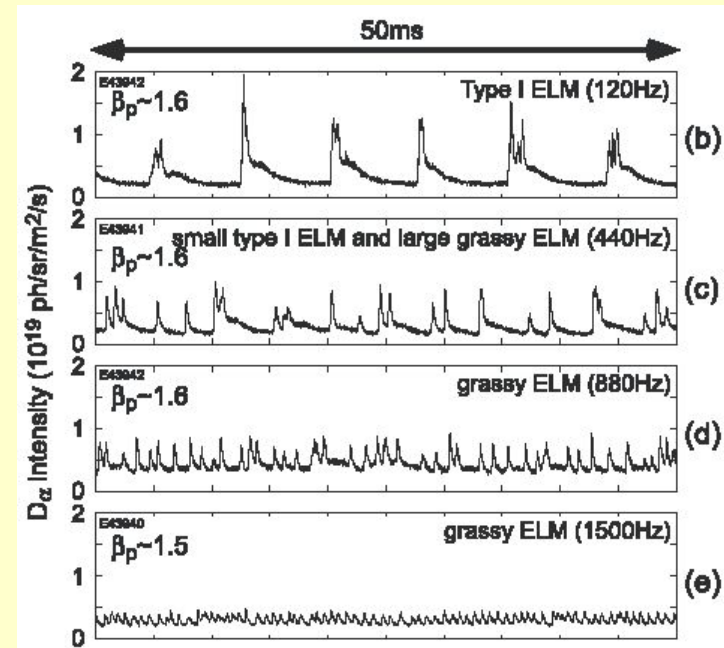
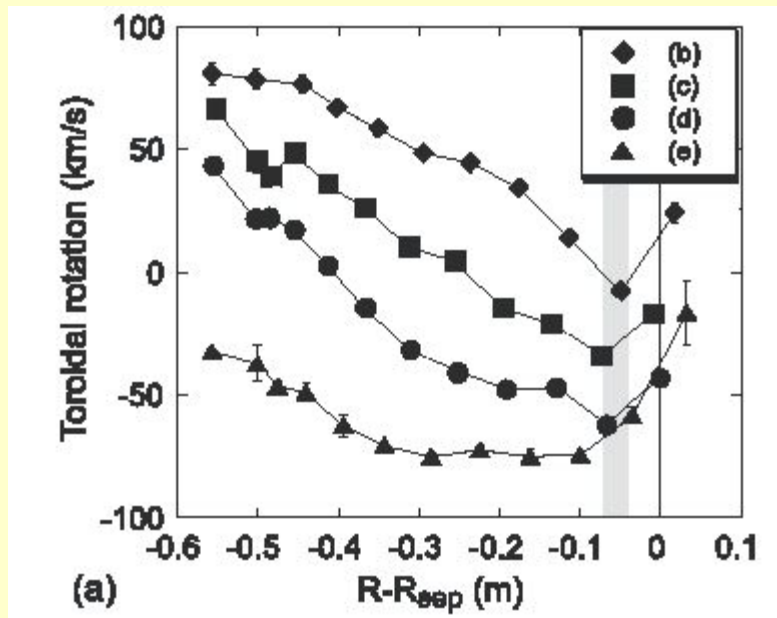


Рис. 90. Управление ELM вращением на JT-60U: *a*) Профили тороидального вращения во внешней экват. плоскости (CXRS). Закрашенная область – верх T_i пьедестала. *(b)–(e)* Временная эволюция сигнала D_α во время сканирования тороидального вращения плазмы с ($q_{95} \sim 4.9$ и $\delta \sim 0.59$). Профили вращения менялись изменение комбинации NBI : *(b)* 2CO+2perp+2N-NB, *c)* 2CO+3perp+1N-NB, *(d)* 2CO+5perp b *(e)* 1CO+1CTR+5perp.

Содержание лекции №4 «Динамика и перенос в пьедестале»

- 4.1. Режимы улучшенного удержания в H-моде при высоких плотностях и операционных пределах
- 4.2. Структура и характеристики пьедестала
- 4.3. L-H переходы
- 4.4. Теория и моделирование переноса в пьедестале
- 4.5. Моделирование структуры пьедестала
- 4.6. Структура Type I ELM, эффекты на профилях пьедестала и техники смягчения
- 4.7. Альтернативы режиму «Type I ELMу H-mode»
- 4.8. Устойчивость пьедестала
- 4.9. Возможные сценарии управления пьедесталом
- 4.10. Выводы по теме «Динамика и перенос в пьедестале»**

- Граничный пьедестал является ключевой областью, определяющей функционирование горячей стационарной плазмы. В ITER Physics Basis были идентифицированы следующие физические проблемы:
 - (i) распространение режима улучшенного удержания для больших плотностей ($\sim n_G$);
 - (ii) создание предсказательных возможностей для давления и радиальной структуры пьедестала в горячей плазме;
 - (iii) смягчение амплитуд гигантских (Type I) ELM;
 - (iv) разработка техники управления давлением пьедестала и ELMs.
- В решении этих задач был сделан существенный прогресс:
 - (i) Режим улучшенного удержания для больших плотностей ($\sim n_G$) был реализован с помощью большой треугольности плазмы;
 - (ii) Теория peeling–ballooning mode объяснила градиента давления в пьедестале в режиме «Type I ELM» и его вариации с изменением формы плазмы. Детальная структура ELM срыва (полоидальная асимметрия, радиальное распределение и др.) были экспериментально выяснены;
 - (iii)- (iv) Были открыты режимы без ELM и с малыми ELM и некоторые из них демонстрировались при низкой столкновительности. Было найдено, что треугольность формы, запас устойчивости, граничное вращение, столкновительность и гармонические осцилляции играют ключевую роль в этих режимах. Экспериментально показано наличие быстрых изменений в радиальном электрическом поле и порога в температурах и их градиентах для L–H перехода.

Наконец, перечислим оставшиеся важные вопросы:

- Наиболее важной является проблема неопределенности в ширине граничного транспортного барьера. Несмотря на наличие мульти-машинной базы данных по структуре пьедестала, скейлинг для ширины не установлен.
- Для профиля плотности, эффекты нейтралов моделировались, но необходимо их более систематическое подтверждение
- Как это было сделано для работы вблизи предела Гринвальда по плотности, распространения в область малой столкновительности также необходимо.
- Для понимания динамики ELM срыва (их периода, например), нелинейная эволюция МГД неустойчивостей должна быть выяснена, также как и эволюция граничного профиля плотности тока и перенос во время ELM.
- Важны попытки распространить режимы без ELM и с малыми ELM для условий, соответствующих реактору.
- Важнейшим инструментом для решения вышеперечисленных проблем видится развитие диагностик периферийных профилей плотности тока.