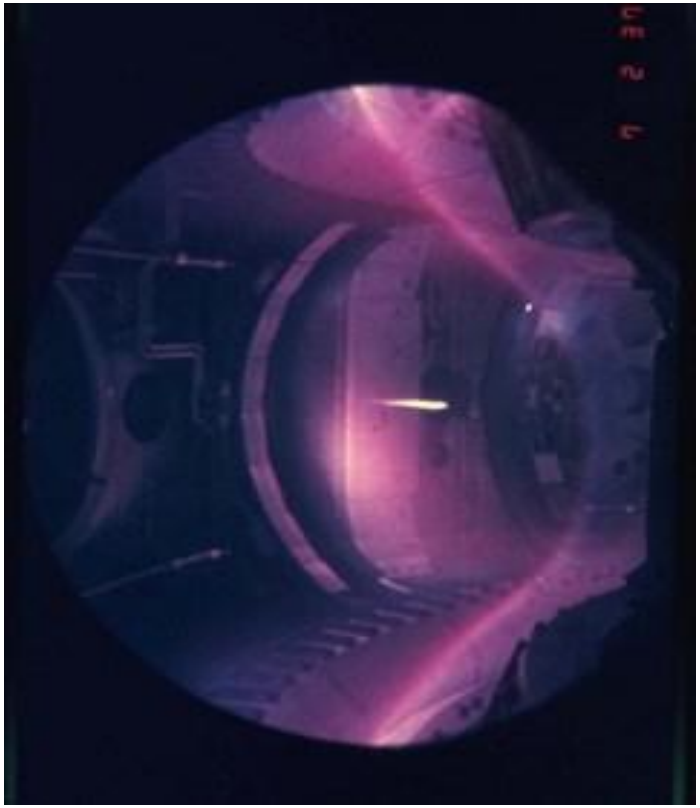
Пеллет инжекция



Захаров В.А.

Семинар 10.04.2013

Содержание

- Введение
- Экранирование и диагностика пеллетов
- Испарение пеллетов
- Эффект ракеты и траектории пеллетов
- Выводы

Введение

Пеллет инжекция – это впрыск микроскопических частиц в плазму при помощи специальных инжекторов.

Пеллеты могут состоять из водорода и его изотопов, Li, B, C, Na, Mg, Al, LiH, Ne и др. веществ.

Пеллеты имеют размер порядка 0.1 - 5 мм и скорость около 1 км/с.

Экранирование пеллета

Механизмы экранирования пеллета:

а) газодинамический – экранирование связано со столкновениями между энергичными частицами плазмы и холодным облаком частиц;

б) магнитное экранирование, вызванное частичным вытеснением магнитного поля из внутренних областей облака;

в) электростатическое экранирование, связанное с возможным накоплением избыточного отрицательного заряда холодного облака по отношению к горячей фоновой плазме.

Экспериментальные измерения

Диагностики параметров облака пеллета:

1) H_α и H_β и примесные линии излучения от легированных пеллетов
2) Камера с высокой скоростью съёмки
3) Камера с большой выдержкой
4) Спектроскопия
5) Диагностика рассеивания
6) Интерферометрия
7) Наблюдение за излучением мягкого рентгена

Экспериментальные измерения

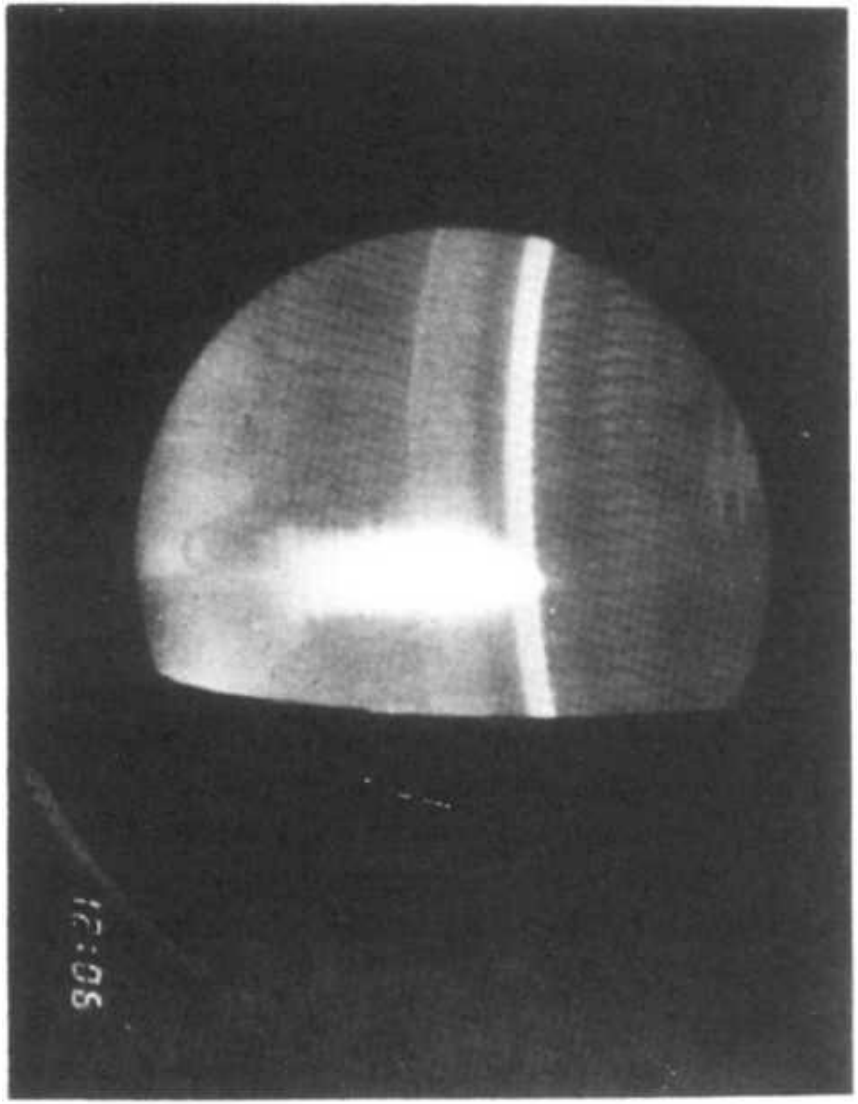


FIG. 1. Time integrated photograph of visible radiation emission taken from an oblique top view from ASDEX shows striations in the toroidal direction. Photo courtesy K. Buchl.

Экспериментальные измерения

С помощью голографической интерферометрии было получено распределение плотности электронов в облаке вокруг пеллета. Так же были записаны эмиссионные линии альфа частиц для мониторинга скорости испарения и глубины проникновения пеллета. Лазерная диагностика была использована для измерения размера и определения положения пеллета в облаке. Распределение температуры T_e (r) и плотности фоновой плазмы n_e(r) были измерены с помощью томсоновского рассеяния непосредственно до и после инжекции пеллета.

Экспериментальные измерения

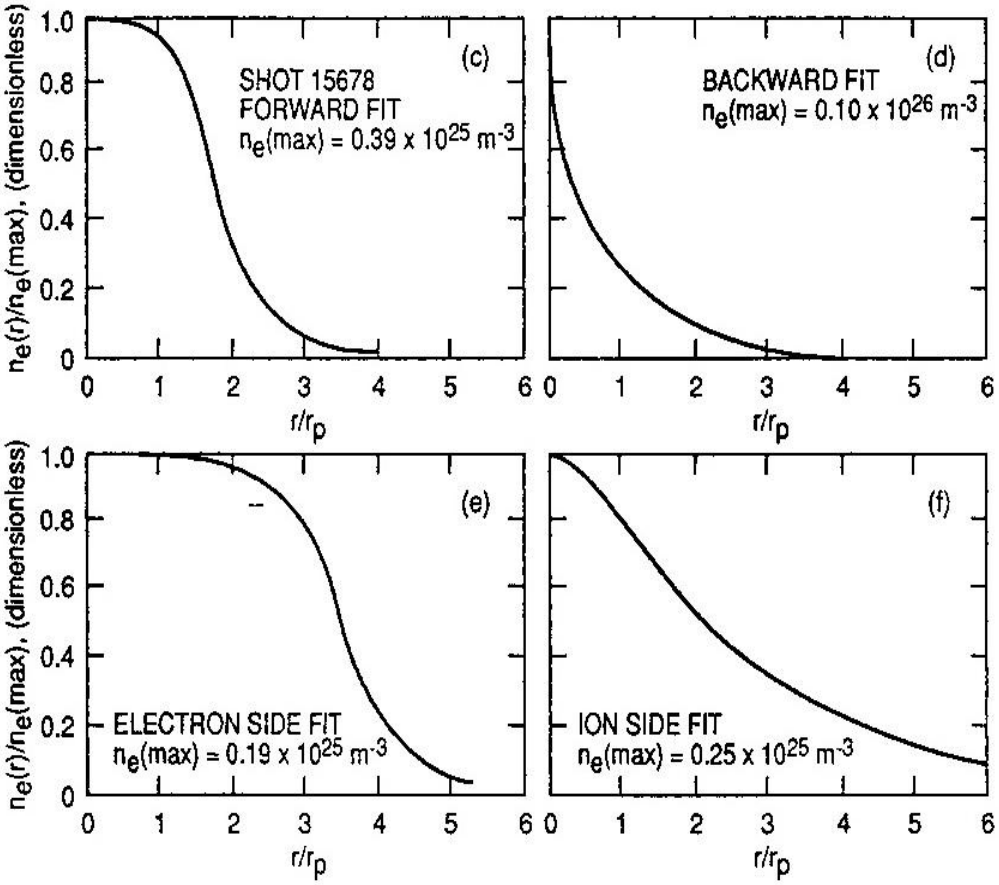


FIG. 2. Data from ISX-B shot 15 678: (a) computer reconstruction of interferogram, (b) contours of constant $n_e l$*, and calculated* $n_e(r)$ *in (c) forward, (d) backward, (e) electron drift and (f) ion drift directions from the pellet 1291.*

Экспериментальные измерения

На токамаке TFR спектроскопическое измерение было использовано при фиксированном положении облака в пространстве, т.е. при единственной полоске. Предполагая степень ионизации равной 0.01-0.5 для центральной плоскости и равновесие Саха, авторы пришли к плотности электронов в центре порядка $1.35*10^{23}$ m^{-3} и электронной температуре в центре порядка 1.6-2 эВ. Температура на расстоянии 2 см от плоскости z=0 была 20 эВ. Ширина борозд варьировалась в пределах 0.7-1.4 см; длина видимой части борозд варьировалась в пределах 3-3.5 см.

Экспериментальные измерения

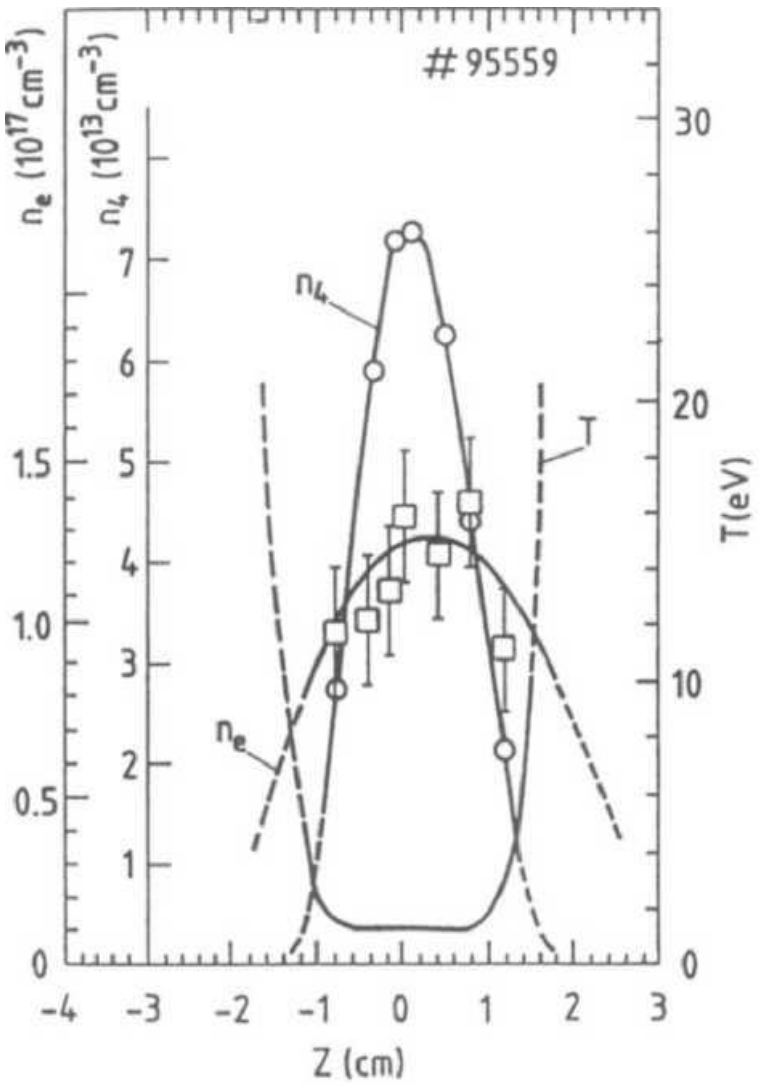
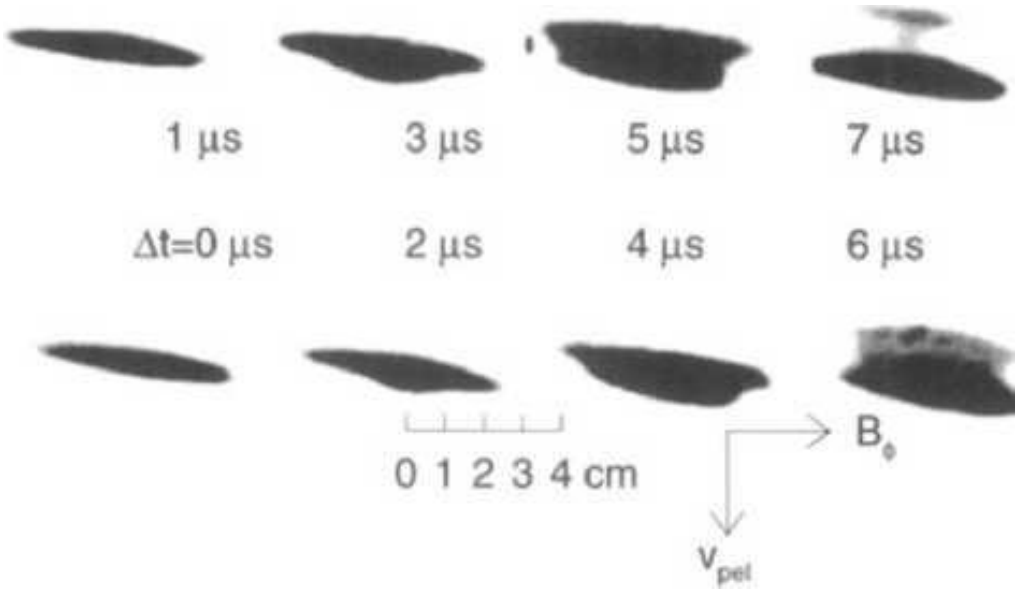


FIG. 3. Electron density n_e*, deuterium density* n_4 *and temperature* T *distributions along a striation in TFR shot 95 559.*

Экспериментальные измерения

Благодаря испусканию света удерживаемыми ионизованными частицами с низким уровнем ионизации, легированные неоном пеллеты дали более чёткую картину страт по сравнению с нелегированными пеллетами дейтерия и более видимое облако (=12см) вдоль силовых линий магнитного поля. Облако расширяется вдоль силовых линий с ионно звуковой скоростью, соответствующей температуре фоновой плазмы.

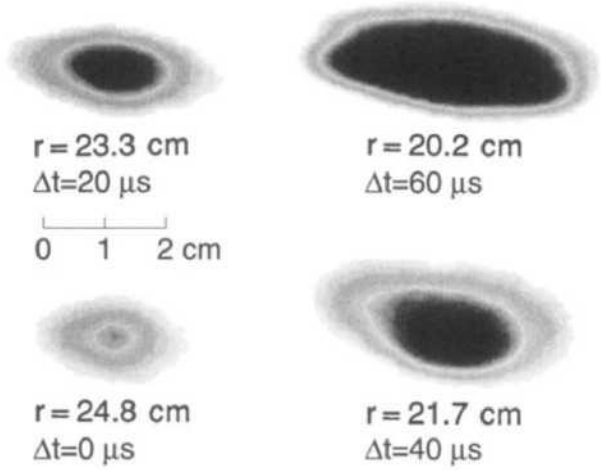
Экспериментальные измерения



Диагностики параметров облака пеллета:
1) H_α и H_β и примесные линии излучения от легированных пеллетов
2) Камера с высокой скоростью съёмки
3) Камера с большой выдержкой
4) Спектроскопия
5) Диагностика рассеивания
6) Интерферометрия
7) Наблюдение за излучением мягкого рентгена

Экспериментальные измерения

Рис.5, так же как и изображения с большой выдержкой, показывает, что радиус облака (пеллет порядка 5мм остаётся внутри облака в течение времени экспозиции) меняется по мере продвижения пеллета к центру плазмы.



Диагностики параметров облака пеллета:
1) H_α и H_β и примесные линии излучения от легированных пеллетов
2) Камера с высокой скоростью съёмки
3) Камера с большой выдержкой
4) Спектроскопия
5) Диагностика рассеивания
6) Интерферометрия

Экспериментальные измерения

Диагностики параметров облака пеллета:
1) H_α и H_β и примесные линии излучения от легированных пеллетов
2) Камера с высокой скоростью съёмки
3) Камера с большой выдержкой
4) Спектроскопия
5) Диагностика рассеивания
6) Интерферометрия
7) Наблюдение за излучением мягкого рентгена

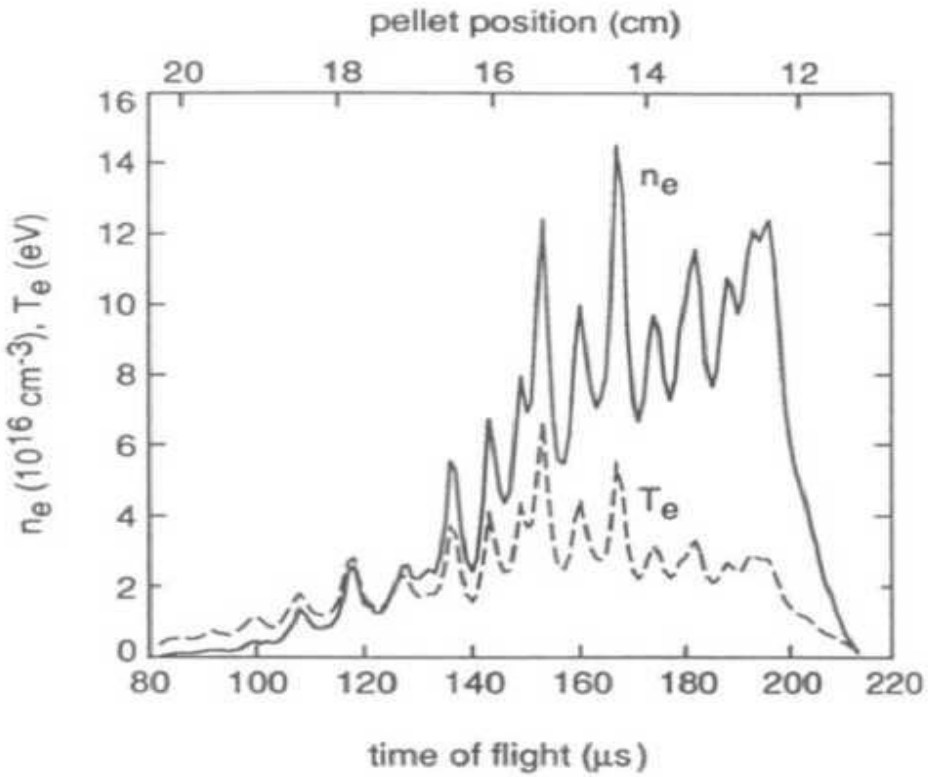


FIG. 6. Temporal variation of the electron temperature and electron density in the pellet cloud in TEXT assuming local thermodynamic equilibrium

Экспериментальные измерения

Так же имеются данные об облаках окружающих углеродные и литиевые пеллеты. Углерод и литий имеют энергию испарения значительно выше чем у водорода: 7.5 и 1.6 эВ соответственно по сравнению с 0.01 эВ на 1 молекулу для водорода, и, следовательно, ожидаемая скорость испарения значительно ниже и поток испарённого вещества с поверхности пеллета имеет намного более низкую плотность, чем в случае водорода.

На TFTR пеллеты использовались для измерения радиального профиля q посредством оптической диагностики, примененной к видимым следам облака углеродного пеллета и эффекта Зеемана для литиевых пеллетов, наблюдая направление поляризации видимой линии излучения ионов Li+.

Испарение пеллета

1) Период предварительного прогрева. Зависит от энергии сублимации вещества. Чем больше энергия сублимации, тем более длителен этот период. Длится доли микросекунд.

2) Второй период, т.е. испарение. Начинается, когда температура поверхности пеллета достигает порога сублимации.

3) Взаимодействие испарённого вещества пеллета с фоновой плазмой. Происходит за характерные транспортные времена, которые, как правило, значительно больше, чем характерное время испарения.

Испарение пеллета

Диагностики параметров облака пеллета:

1) H_α и H_β и примесные линии излучения от легированных пеллетов

2) Камера с высокой скоростью съёмки

3) Камера с большой выдержкой

4) Спектр

5) Диагно

$$Z \equiv \frac{d_{\mathrm{pel}}^{5/3}(\mathrm{mm})v_{\mathrm{pel}}(\mathrm{km/s})}{n_{\mathrm{e0}}^{1/3}(10^{13}\ \mathrm{cm}^{-3})T_{\mathrm{e0}}^{5/3}(\mathrm{keV})}$$

6) Интерферометрия

7) Наблюдение за излучением мягкого рентгена

Испарение пеллета

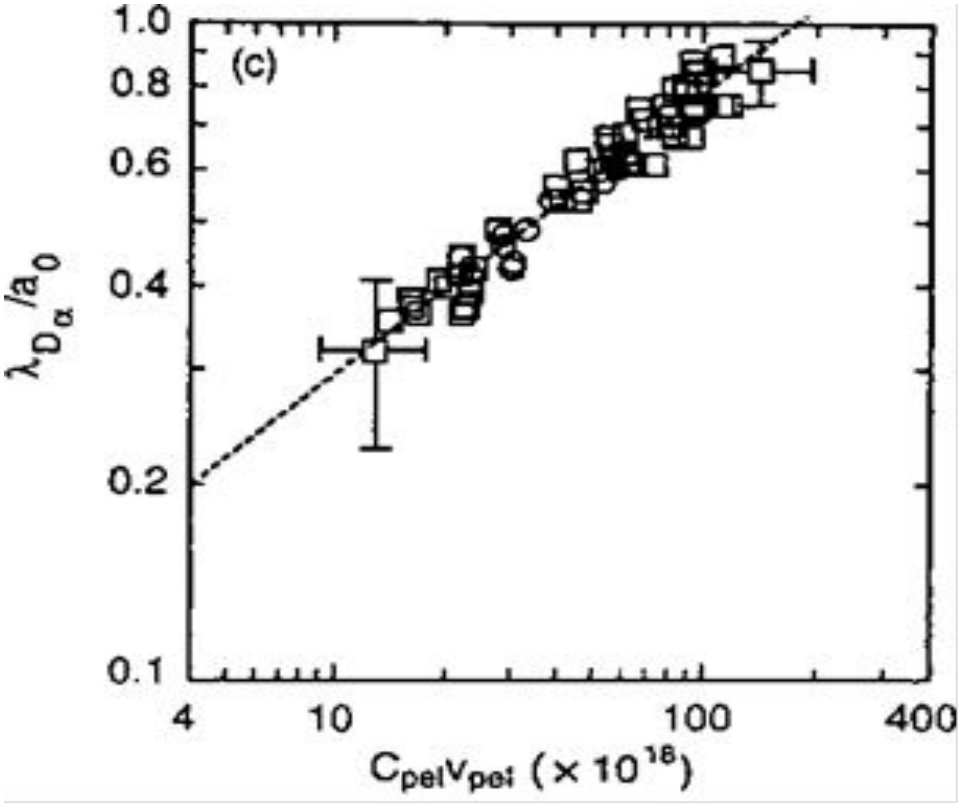
В экспериментах выполненых на JET были исследованы скорости пеллета 0.46-1.35 км/с. Используется та же самая общая форма для скорости испарения пеллета, принятая в анализе ASDEX, но выражение, обобщённое включением размера плазмы и влияния изотопов водорода, привело к нормализованной глубине проникнове

$$\frac{\lambda}{a_0} \propto \left(\frac{v_{\mathrm{pel}} n_{\mathrm{m}} A_{\mathrm{pel}}^{1/3} r_{\mathrm{pel0}}^{5/3}}{a_0 n_{\mathrm{e0}}^{1/3} T_{\mathrm{e0}}^{5/3}} \right)^{\beta_{\mathrm{ngs}}} = \left(C_{\mathrm{pel}} v_{\mathrm{pel}} \right)^{\beta_{\mathrm{ngs}}}$$

Диагностики параметров облака пеллета:

1) H_α и H_β и примесные линии излучения от легированных пеллетов
2) Камера с высокой скоростью съёмки
3) Камера с большой выдержкой
4) Спектроскопия
5) Диагностика рассеивания
6) Интерферометрия
7) Наблюдение за излучением мягкого рентгена

Испарение пеллета



Диагностики параметров облака пеллета:
1) H_α и H_β и примесные линии излучения от легированных пеллетов
2) Камера с высокой скоростью съёмки
3) Камера с большой выдержкой
4) Спектроскопия
5) Диагностика рассеивания
6) Интерферометрия
7) Наблюдение за излучением мягкого рентгена

Испарение пеллета

Сравнение результатов JET и ASDEX на Рис. 13 показывает несоответствие в измеренных нормализованных глубинах проникновения, которое может быть объяснено удалением компенсирования, связанного с повышением испарения на периферии

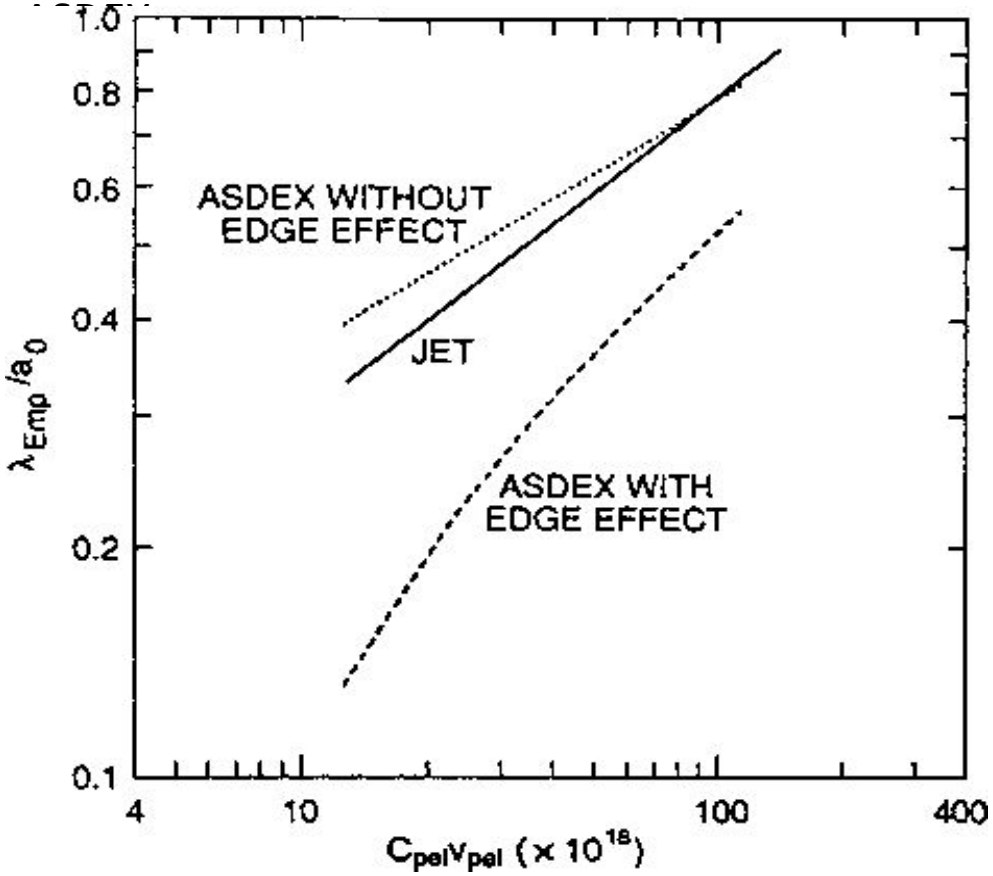


FIG. 13. An empirical fit to JET data shows the same scaling as the fit to ASDEX data by Buchl et al. , but penetration is significantly deeper in JET. Neglecting the offset in the ASDEX fit brings the results into reasonable agreement.

Эффект ракеты и траектории пеллетов

Диагностики параметров облака пеллета:

1) H_α и H_β и примесные линии излучения от легированных пеллетов

2) Камера с высокой скоростью съёмки

3) Камера с большой выдержкой

4) Спектроскопия

5) Диагностика рассеивания

6) Интерферометрия

7) Наблюдение за излучением мягкого рентгена

Выводы

Высокоскоростная инжекция пеллетов может быть использована для:

1) дозаправки плазмы в магнитных ловушках;
2) обострения профиля плотности плазмы;
3) определение направления локального магнитного поля и, следовательно, профиля q(r);
4) определение профиля плазменного тока.

Плюсы инжекции пеллетов, как метода дозаправки плазмы, по сравнению с другими методами:

1) большая энергоэффективность, например, по сравнению с NBI;
2) улучшение контроля за профилем плотности плазмы, по сравнению с инжекцией газа с края плазмы;
3) улучшение удержания энергии и частиц.