

04:05;12

Исследование пылевой моды испарения углеродных макрочастиц в стеллараторе W7-AS

© В.Ю. Сергеев,¹ В.Г. Скоков,¹ В.М. Тимохин,¹ Б.В. Кутеев,² В.Ю. Мартыненко,² Р. Бурхенн³

¹ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sergeev@phtf.stu.neva.ru

² Институт ядерного синтеза, РНЦ „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
e-mail: kuteev@phtf.stu.neva.ru

³ Max Planck Institut für Plasmaphysik, Sub-Institute Greifswald, EURATOM
Association, 17491 Greifswald, Германия
e-mail: Rainer.Burhenn@ipp.mpg.de

(Поступило в Редакцию 6 апреля 2006 г.)

Исследован новый тип испарения углеродных макрочастиц (пеллетов) в плазме стеллараторов Wendelstein 7-AS (W7-AS) с высокой плотностью и ионным нагревом плазмы. Отличительным свойством (по сравнению с обычным испарением в виде атомов или кластеров) является то, что с поверхности пеллета во время испарения эмитируются небольшие (микронных размеров) „микрочастицы“ углерода. Проведены оценки углов отлета и скоростей таких микрочастиц. С помощью различных методов оценены размеры микрочастиц. Полученные результаты сравниваются с теоретическими предсказаниями.

PACS: 52.27.-n

Введение

Как показывает ряд теоретических и экспериментальных исследований [1–3], тепловой удар по поверхности твердого углерода может приводить к ее хрупкому разрушению, сопровождаемому эмиссией микрочастиц размером $(0.01–10) \cdot 10^{-6}$ м. Этот эффект может играть существенную роль в формировании периферийной плазмы установок с магнитным удержанием плазмы, где основным элементом покрытия первой стенки камеры являются углеродные пластины [4–6]. Недавно [7] анализ интегральных фотографий излучения, полученных при испарении углеродных пеллетов, инжектированных в плазму высокой плотности стелларатора W7-AS с мощным ИНА (инжекция нейтральных атомов) и небольшим ИЦР (ионный циклотронный резонанс) нагревами, показали, что от основного пеллета откалываются маленькие частицы (микрпеллеты). В данной работе представлены результаты оценок характерных размеров и скоростей этих микрпеллетов, которые сравниваются с теоретическими.

Схема эксперимента

В экспериментах сферические углеродные пеллеты диаметром $(0.35–0.41) \cdot 10^{-3}$ м со скоростью 250–300 м/с инжектировались с помощью инжектора ДИМ-6 [8] радиально в направлении магнитной оси плазмы W7-AS. Процесс испарения пеллета наблюдался как с помощью CCD-камеры (в пространственных координатах) так и посредством широкообзорного фотодетектора (ШОФД) (временная развертка). Свечение

пеллетного облака регистрировалось в линии излучения СII $723 \cdot 10^{-9}$ м с помощью интерференционных светофильтров. Более подробно постановка эксперимента была описана в работах [9,10]. Радиальный профиль скорости испарения $\dot{N}(r)$ определялся по излучению I_{cl} на линии СII в предположении того, что \dot{N} пропорционально I_{cl} [10]. Инжекция проводилась в дейтериевую плазму с мощным дейтериевым ИНА и небольшим ИЦР-нагревом со следующими параметрами: $n_e(0) = (7.9–11.5) \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $T_e(0) = 300–450 \text{ eV}$, $P_{\text{NBI}} = 1.75 \cdot 10^6 \text{ W}$ (водород, ускоряющее напряжение $56 \cdot 10^3 \text{ V}$), $P_{\text{ICRH}} = (0.1–0.5) \cdot 10^6 \text{ W}$ (нагрев на второй гармонике водорода, нецентральный, смещенный в сторону слабого магнитного поля, частота $f_{\text{ICRH}} = 3.8 \cdot 10^7 \text{ Hz}$).

Результаты эксперимента и их обсуждение

Наиболее характерные снимки CCD-камеры, иллюстрирующие эмиссию микрпеллетов во время испарения основного пеллета, представлены на рис. 1–3. Пеллет на рисунках инжектируется слева направо и тороидально ускоряется в направлении магнитного поля, которое показано вертикальной стрелкой на рисунках. Кривые, отходящие от основного пеллетного трека, являются следами испарения эмитированных пылинок — микрпеллетов. Отметим, что на рис. 1 данный эффект наблюдается только в начале процесса испарения, а затем прекращается.

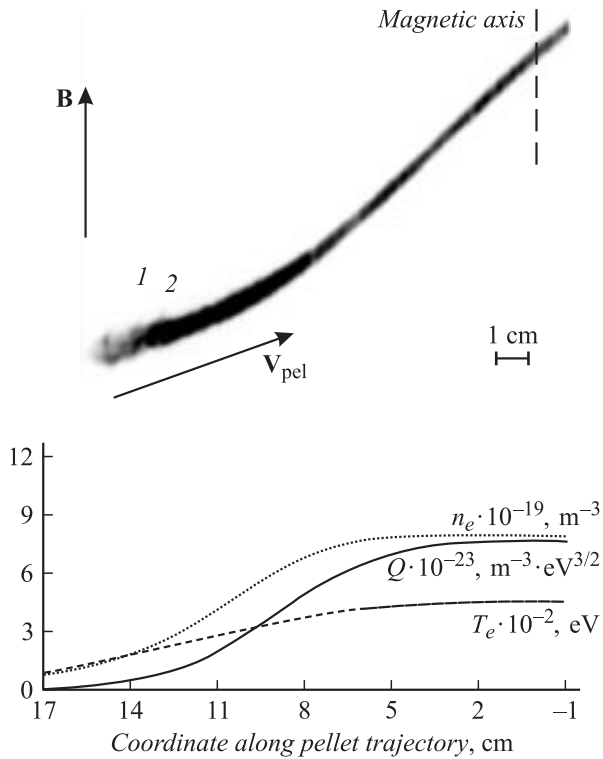


Рис. 1. Интегральная фотография (вид снизу) трека пеллета с эмиссией микропеллетов в разряде 41018, профили n_e , T_e и теплового потока Q вдоль траектории пеллета. Параметры разряда: $n_{e0} = 7.9 \cdot 10^{19} m^{-3}$, $T_{e0} = 450 eV$, $P_{NBI} = 1.75 \cdot 10^6 W$, $P_{ICRH} = 0.1 \cdot 10^6 W$, $\varnothing_{pel} = 0.41 \cdot 10^{-3} m$, $V_{pel} = 300 m/s$.

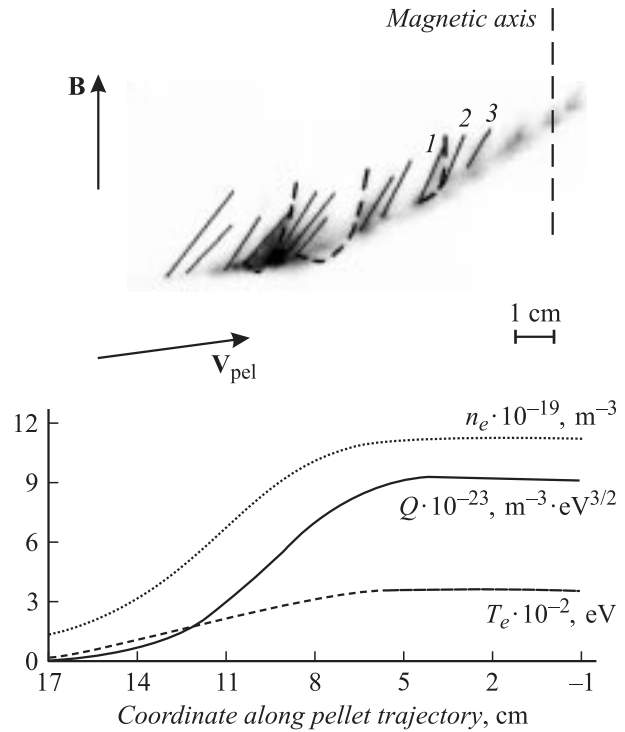


Рис. 3. То же, что на рис. 1, в разряде 41025. На снимке выделены треки отдельных микропеллетов. Параметры разряда: $n_{e0} = 11.5 \cdot 10^{19} m^{-3}$, $T_{e0} = 300 eV$, $P_{NBI} = 1.75 \cdot 10^6 W$, $P_{ICRH} = 0.5 \cdot 10^6 W$, $\varnothing_{pel} = 0.35 \cdot 10^{-3} m$, $V_{pel} = 280 m/s$.

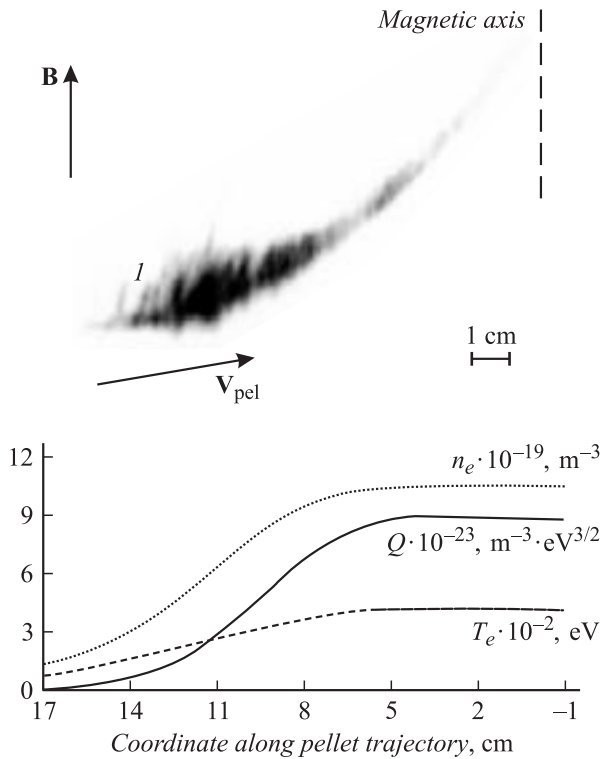


Рис. 2. То же, что на рис. 1, в разряде 41019. Параметры разряда: $n_{e0} = 10.5 \cdot 10^{19} m^{-3}$, $T_{e0} = 400 eV$, $P_{NBI} = 1.75 \cdot 10^6 W$, $P_{ICRH} = 0.2 \cdot 10^6 W$, $\varnothing_{pel} = 0.35 \cdot 10^{-3} m$, $V_{pel} = 260 m/s$.

На рис. 4 сравниваются радиальные профили скорости испарения, измеренные экспериментально и рассчитанные по модели нейтрального экранирования (МНЭ) [11]. Представленные на рис. 4 экспериментальные профили скорости испарения, пользуясь классификацией, введенной в работах [10,12], где различались три типа испарения пеллетов, можно отнести к типу 2 (повышенное испарение). Таким образом, новая мода испарения с эмиссией микропеллетов может быть идентифицирована только по снимкам процесса испарения, полученным с помощью CCD-камеры.

Можно также отметить, что сигналы излучения в линии CII, полученные как с помощью фотодиода, так и методом интегрирования снимка CCD-камеры, имеют (особенно в разряде 41019) высокий уровень модуляции интенсивности вдоль траектории пеллета. Такие модуляции уже наблюдались ранее (см., например, рис. 12, 13 в работе [10]), но их относительная амплитуда была заметно меньше, и структура была выражена слабее. Повышенная модуляция интенсивности излучения может происходить за счет испарения микропеллетов, которые отлетают от поверхности основного пеллета и увеличивают суммарную поверхность испарения. Отметим, что тип испарения с дополнительной генерацией микропеллетов наблюдался только в разрядах с ИНА при высокой плотности плазмы и относительно низкой электронной температурой.

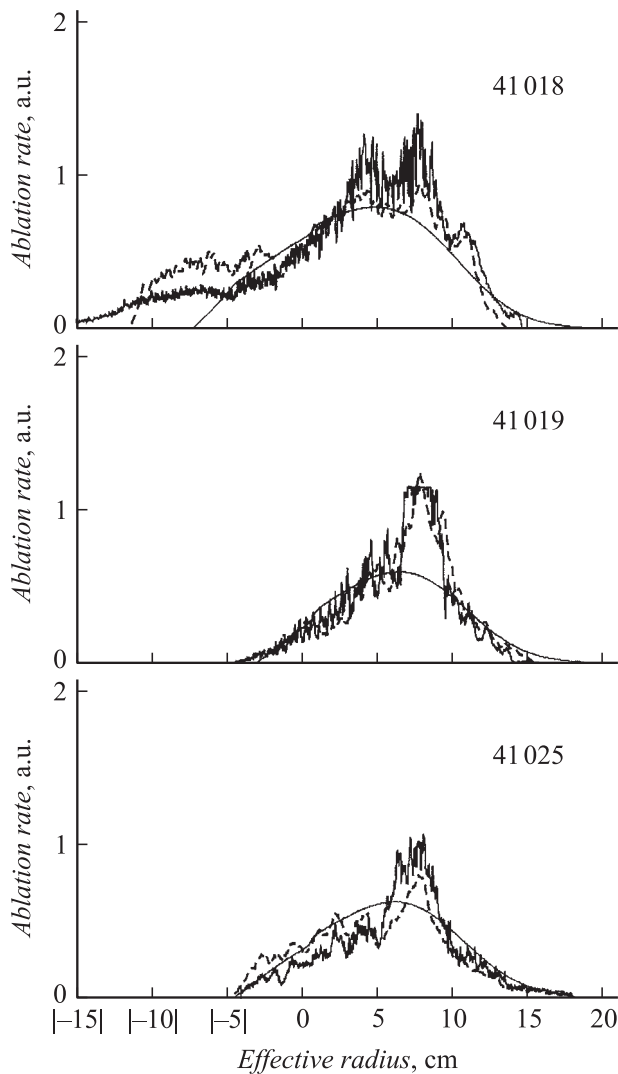


Рис. 4. Профили скорости испарения для разрядов 41018, 41019, 41025. Сплошная линия — измерено с помощью широкообзорного фотодетектора; штриховая — радиально разрешенный снимок CCD-камеры, полученный интегрированием вдоль силовых линий магнитного поля; тонкая сплошная линия — расчет по МНЭ.

К сожалению, в разряды такого типа инъекция производилась очень редко. В связи с недостаточной статистикой трудно определить, какой именно параметр плазмы ответствен за наблюдаемый эффект. Одной из возможных причин может быть режим нагрева с помощью ИНА и ИЦР, когда быстрые частицы создают тепловой источник внутри тела пеллета ближе к его поверхности по сравнению с тепловым источником, создаваемым электронами. Более высокий температурный градиент на поверхности пеллета может инициировать хрупкое разрешение и эмиссию микропеллетов.

Быстрые ионы могут существовать во всем сечении плазменного шнура. Преимущественное наблюдение микропеллетов на периферии плазменного шнура

(см. рис. 1, 2) может объясняться тем обстоятельством, что по мере проникновения основного пеллета в области плазмы с более высокой T_e , если микропеллеты появляются, то они должны испаряться быстрее, не отдаляясь значительно от основного пеллета. Таким образом, их треки могут оказаться внутри облака основного пеллета и быть неразличимыми на снимках.

Оценки скоростей микропеллетов

Скорости микропеллетов вычислялись в приближении того, что они отлетают от пеллета в направлении, нормальном к траектории основного пеллета в плоскости фотографии (рис. 1–3). Вследствие этого предположения значения скорости могут быть недооценены. Детальное статистическое исследование скоростей микропеллетов проводилось для разряда 41025, представленного на рис. 3, так как в нем был получен снимок, на котором различимо максимальное число микропеллетов. Для исследования углового распределения отлетающих частиц было отобрано двенадцать треков микропеллетов, летящих „вверх“ (см. верхнюю часть рис. 3, где треки отмечены сплошными линиями). Они отходят в основном под углом $30\text{--}40^\circ$ к скорости основного пеллета. Гистограмма соответствующих скоростей микропеллетов на рис. 5 показывает, что наиболее вероятны нормальные скорости $150\text{--}250$ м/с.

Заметно, что микропеллеты отлетают не только „вверх“. Тщательное изучение снимка позволяет обнаружить несколько треков микропеллетов, отлетающих от поверхности пеллета „вниз“, но затем их треки загибаются „вверх“ (рис. 3, штриховые линии). Это позволяет сделать предположение о существовании силы, которая, как видно из рис. 3, изгибает траектории как основного пеллета, так и эмитированных микропеллетов „вверх“. Таким образом, микропеллеты, эмитированные „вниз“, замедляются и затем ускоряются „вверх“. К сожалению, разрешение фотографии недостаточно для детального исследования микропеллетов, отделившихся „вниз“.

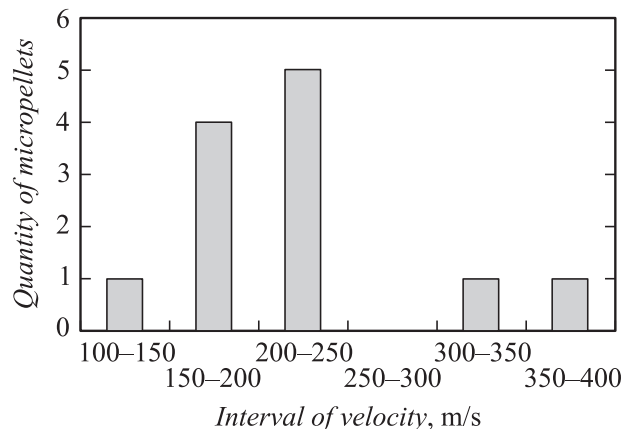


Рис. 5. Гистограмма распределения нормальных скоростей микропеллетов в разряде 41025.

Таблица 1. Оценки скорости микропеллетов

Номер разряда	V_{pel} , m/s	Полное число микропеллетов	Число изученных микропеллетов	Испущены „вверх“	Средний угол рассеяния, град.	Средняя скорость V_0 нормальная к треку пеллета, m/s
41018	300	3	3	3	41.3	270
41019	260	11	5	11	55.1	385
41025	280	≥ 23	13	≥ 16	37.1	220

Таблица 2. Оценки радиусов микропеллетов

Номер разряда	Номер микропеллета	$n_e(\rho)$, $\times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	$T_e(\rho)$, eV	Метод оценки *	Радиус микропеллета, $\times 10^{-6} \text{ m}$
41018 (рис. 1)	1	2.7	220	1	32.9
41018 (рис. 1)	2	4.1	270	1	22.0
41019 (рис. 2)	1	3.8	190	1	33.2
41025 (рис. 3)	1	12	310	2	38.1
41025 (рис. 3)	2	12	310	1	40.2
41025 (рис. 3)	2	12	310	2	48.0
41025 (рис. 3)	3	12	310	2	37.2

* Примечание. 1 — по интегральному излучению, 2 — по глубине проникновения микропеллета.

Результаты исследования параметров микропеллетов в разрядах 41018, 41019, 41025 суммированы в табл. 1.

Отметим, что полученные значения скорости наблюдаемых углеродных пылевидных частиц коррелируют со значениями 240–260 m/s, предсказываемыми по модели хрупкого разрушения углерода в работе [1]

$$V_0 = \alpha T \xi c,$$

где $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ — фактор теплового расширения углерода, $T = 4000\text{--}4500 \text{ K}$ — температура поверхности углерода [11], $\xi \cong 1$ — доля зажатого объема зерна углерода и $c = 3 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ — скорость звука в углероде.

Заметное на снимках (рис. 1–3) искривление траекторий наблюдалось и в случае примесной пеллет-инжекции в плазму установки CHS с ИНА-нагревом [13], где было высказано предположение о сильном влиянии быстрых ионов (из-за одностороннего нагрева) на испарение пеллета. В нашем случае необходимо сделать важное замечание относительно эффективности ИНА нагрева. Пучки нейтральных атомов вводятся в плазму с помощью двух (ко- и контр-) ИНА мощностью примерно $0.8 \cdot 10^6 \text{ W}$ каждый. Проблема заключается в том, что, согласно оценкам, ожидается разное поглощение мощности по отношению к направлению магнитного поля. Инжектор в направлении положительного магнитного поля является контринжектором и имеет меньшую эффективность, так как значительное число орбит быстрых частиц покидает плазму. Инжектор, направленный противоположно магнитному полю, является коинжектором с полным высаживанием мощности. Следовательно, не стоит ожидать точного баланса потока мощности ИНА на пеллет даже в случае одинаковой мощности. Это

может приводить к несбалансированному ионному испарению поверхности пеллета и к соответствующему ускорению пеллета в тороидальном направлении. Таким образом, можно считать установленным, что причина наблюдаемого явления — реактивное ускорение вследствие испарения в условиях несимметричного нагрева.

Оценки размера микропеллетов

Для определения размера микропеллетов были разработаны две методики. Первая основана на расчете отношения интегральной интенсивности излучения из облака одиночного микропеллета к интегральной интенсивности излучения из облака пеллета в целом, при известном размере пеллета до инъекции. Другая методика оценки базируется на сравнении измеренной длины трека микропеллета с той, которая оценивается по МНЭ.

Отношение интегралов интенсивности излучения. Для исследования были выбраны микропеллеты, отмеченные цифрами 1 и 2 (рис. 1) в разряде 41018, 1 в разряде 41019 (рис. 2) и 2 в разряде 41025 на рис. 3 (табл. 2). Выбор был сделан исходя из того, что эти микропеллеты расположены достаточно далеко от соседних, так что их треки не перекрываются. Это позволяет выделить интенсивность излучения микропеллета из облака испаряющегося основного пеллета. Как показано в работе [10], интегральная по пеллетному облаку интенсивность излучения испаряющегося пеллета I пропорциональна скорости его испарения \dot{N} . Таким образом, интегральный свет из облака пропорционален полному числу атомов в пеллете. Из рис. 1–3 можно определить интегралы излучения из облаков как основного пеллета I_{pel} , так и микропеллетов $I_{micropel}$. Количество атомов

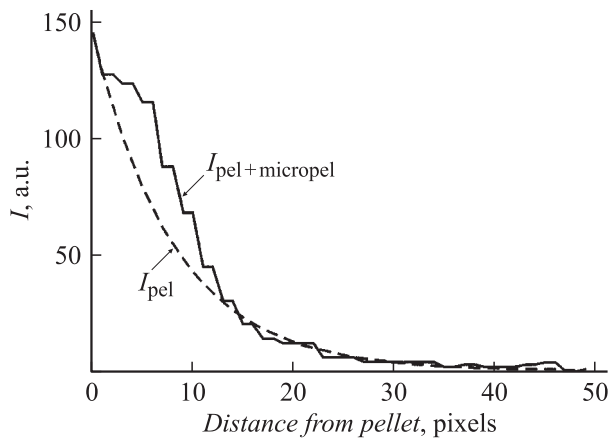


Рис. 6. К методу определения интенсивности излучения микропеллета I_{micropel} на фоне основного пеллета. Сплошная линия — излучение микропеллета в сумме с излучением основного пеллета $I_{\text{pel+micropel}}$, штриховая — аппроксимация излучения основного пеллета I_{pel} .

в основном пеллете и всех микропеллетах $N_{\text{pel+micropel}}$ известно из плотности $\rho = 0.9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ и начального радиуса основного пеллета до инжекции. Следовательно, количество атомов в микропеллете может быть вычислено по формуле

$$N_{\text{micropel}} = \frac{\int I_{\text{micropel}}}{\int I_{\text{pel+micropel}}} N_{\text{pel+micropel}}. \quad (1)$$

Треки микропеллетов начинаются в области, где интенсивно излучает основной пеллет, как это видно из рис. 6. Фоновое излучение основного пеллета I_{pel} должно быть вычтено из полного суммарного излучения основного пеллета совместно с излучением микропеллетов $I_{\text{pel+micropel}}$. Для этого в соответствии с экспериментальными наблюдениями работы [14] тороидальное распределение пеллетного облака I_{pel} аппроксимировалось экспонентой (штриховая кривая на рис. 6). Значения радиуса микропеллетов, полученные по формуле (1), представлены в табл. 2. Они соответствуют значениям объема микропеллетов, составляющим $\sim (0.15-1.2)\%$ от объема пеллета до инжекции. Точность этих оценок составляет $\sim 100\%$ из-за проблем с выделением слабого микропеллетного излучения из суммарного излучения основного пеллета и микропеллетов.

Моделирование глубины проникновения с помощью МНЭ. Размер микропеллета может быть оценен из сопоставления измеренной длины его проникновения в плазму с длиной, рассчитанной по МНЭ. Для моделирования испарения микропеллета необходимы профили параметров плазмы вдоль ее траектории. К сожалению, в случае разрядов 41018-41025 не хватает данных, для того чтобы точно рассчитать трехмерную траекторию микропеллета. Поэтому испарение рассчитывалось в предположении постоянных значений

$n_e(\rho)$ и $T_e(\rho)$, соответствующих малому радиусу начала испарения микропеллета $\rho = \rho_{\text{micropel}}$. Проводилось моделирование испарения микропеллетов, отмеченных цифрами 1-3 на рис. 3, для которых это предположение соответствует наилучшим образом. Параметры расчета были следующими: $n_e(\rho) \sim (1.1-1.2) \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $T_e(\rho) = 300 \text{ eV}$, измеренная по снимку длина треков составляет $(2.1-3.0) \cdot 10^{-2} \text{ m}$. Моделирование с целью получить такую же глубину испарения дает радиусы микропеллетов $(37-48) \cdot 10^{-6} \text{ m}$ (табл. 2). Точность таких оценок не очень высока ($\sim 50\%$) из-за указанной выше неопределенности параметров плазмы вдоль траектории микропеллета. Тем не менее полученные размеры микропеллетов неплохо соответствуют тем, что оценены по отношению интегралов интенсивности излучения.

Отметим, что полученные размеры микропеллетов (десятки микрон) заметно отличаются от микронных размеров микропеллетов, предсказываемых в моделях хрупкого разрушения углерода [1]. Причины такого расхождения не ясны.

Заключение

В режимах с большой электронной плотностью и ионным (ИНА + ИЦР) нагревом плазмы обнаружен новый тип испарения углеродных пеллетов — с эмиссией микропеллетов. Микропеллеты покидают поверхность основного пеллета под средним углом порядка 45° . Компонента скорости микропеллета, нормальная к треку основного пеллета, находится в диапазоне $220-385 \text{ m/s}$, что неплохо соответствует теоретически предсказываемым значениям скорости кусочков графита, испускаемых твердой углеродной поверхностью в условиях теплового удара.

Оценки радиусов микропеллетов по отношению интегралов интенсивности излучения дают значения порядка $(20-40) \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Измеренные глубины проникновения микропеллетов соответствуют их радиусам около $(40-50) \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Предсказываемые микронные размеры микропеллетов в модели хрупкого разрушения углерода заметно ниже. Причины такого расхождения не ясны.

Обнаружена однонаправленная сила, ускоряющая как основной пеллет, так и микропеллеты в направлении магнитного поля. Ускорение микропеллетов более отчетливо из-за их меньшей массы. Вероятной причиной наблюдаемого явления является реактивное ускорение из-за несимметричного испарения поверхности основного пеллета и микропеллетов быстрыми ионами.

Авторы выражают благодарность группе W7-AS за сотрудничество.

Работа была поддержана грантами РФФИ 04-02-16911-а, 05-02-17160-а, 05-02-17269-а, 05-02-08026-офи_э.

Список литературы

- [1] Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1999. № 2. С. 31–34.
- [2] Гусева М.И. и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. С. 106–123.
- [3] Гусева М.И. и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. С. 48–51.
- [4] Winter J. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. Vol. 46. P. B583–B592.
- [5] Krasheninnikov S.I. et al. // Phys. Plasmas 2004. Vol. 11. P. 3141.
- [6] Ogorodnikova O.V. et al. // J. of Nuclear Materials. 2005. N 337–339. P. 791–794.
- [7] Kuteev B.V. et al. // 31st EPS Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion. London, 28 June–2 July 2004. ECA Vol. 28G. P. 1–205.
- [8] Lang P.T. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1994. Vol. 65. N 7. P. 2316–2321.
- [9] Ledl L. et al. // 26th EPS Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion. Maastricht, 14–18 June 1999. ECA Vol. 23J. P. 1477.
- [10] Ledl L. et al. // Nuclear Fusion. 2004. Vol. 44. P. 600–608.
- [11] Кутеев Б.В., Сергеев В.Ю., Цендин Л.Д. // Физика плазмы. 1984. Т. 10. Вып. 6. С. 1172–1179.
- [12] Тимохин В.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 7. С. 83–87.
- [13] Morita S. et al. // Nuclear Fusion. 2002. Vol. 42. P. 876–880.
- [14] Бахарева О.А. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 4. С. 316–326.