

03;04;12

## Эксперименты по инъекции пылевых струй в плазму

© Д.В. Вялых, А.Е. Дубинов, И.Л. Львов, С.А. Садовой, В.Д. Селемир

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,

607190 Саров, Нижегородская область, Россия

e-mail: dubinov@ntc.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 18 февраля 2004 г.)

Разработана методика проведения экспериментов по изучению инъекции пылевых струй в воздушную плазму тлеющего разряда. Проведены измерения скорости и времени пролета пылевых струй при разных начальных условиях. Показано, что при пролете частиц вдоль и поперек разряда появляется неустойчивость самосжатия, которая приводит к появлению агломерации и кластеризации частиц в плазме.

В экспериментах с запыленной плазмой важным является вопрос о том, как частицы конденсированной фазы вещества (пылинки) попадают в объем, занимаемый плазмой. Во-первых, частицы могут или вырастать из газовой фазы при плазменно-химических взаимодействиях [1] и конденсации в распадающейся плазме [2], или попадать в плазму в результате эрозии электродов [3] и изоляторов [4]. Во-вторых, они могут быть инжектированы в плазму с помощью специальных устройств.

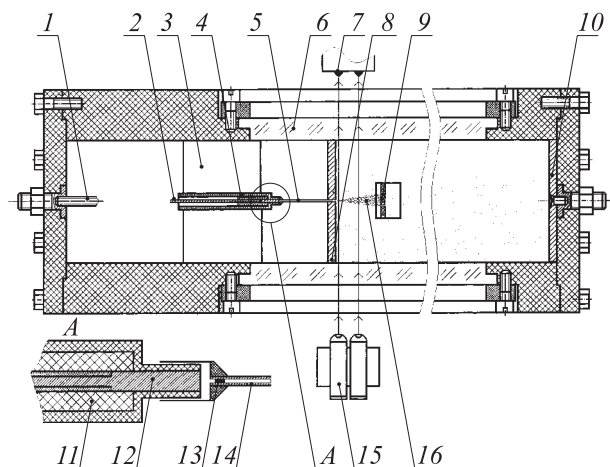
Были проанализированы известные из литературы различные способы инъекции частиц в плазму и соответствующие виды инжекторов, среди которых механически встряхиваемый сетчатый контейнер частиц, установленный сверху камеры [5,6]; вибрирующая мембрана (использовался динамик громкоговорителя), установленная на дне камеры и подбрасывающая частицы [7]; вращающийся внутри камеры барабан с лопастями с горизонтальной осью, поднимающий частицы вверх [8,9].

Первые два способа были опробованы нами экспериментально. Было установлено, что перечисленные способы и устройства не удовлетворяют условиям локальности и прецизионности инъекции, так как начальные координаты и компоненты скорости, с которыми пылинки попадают в плазму, имеют значительные разбросы.

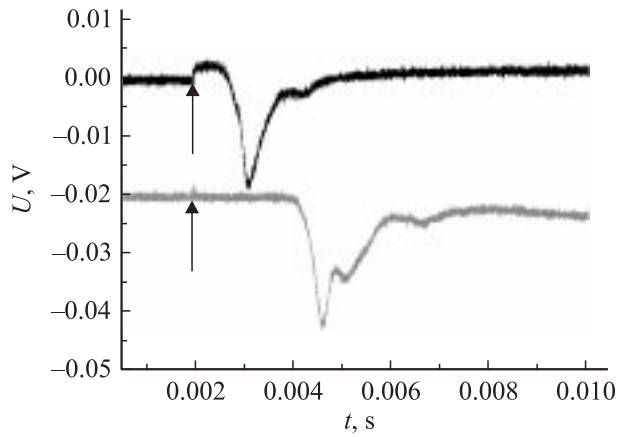
Поэтому нами недавно была предложена концепция прецизионного игольчатого инжектора пылинок в плазму, разработана его конструкция, а последующие эксперименты подтвердили его высокие эксплуатационные качества. С его помощью были проведены эксперименты по вертикальной инъекции частиц вниз со скоростью их свободного падения поперек разрядного тока на пролетной базе 10 см, в которых было обнаружено рассеяние пылинок коллективными колебаниями плазмы [10]. Эти эксперименты проводились с частицами, имеющими размер  $(60 \pm 5) \mu\text{m}$ . С помощью игольчатого инжектора было также реализовано управляемое ориентирование удлиненных пылинок диаметром  $100 \mu\text{m}$  и длиной 3 мм [11].

Ожидалось, что использование частиц с меньшим размером может привести к тому, что будут обнаружены новые эффекты, которые незаметны с тяжелыми частицами. Однако оказалось, что техника вертикальной

инъекции частиц сквозь иглу под действием силы гравитации приводит к определенным проблемам: частицы размером  $40 \mu\text{m}$  и менее имеют между собой заметное сцепление и забивают канал иглы. Поэтому было решено так изменить схему эксперимента (рис. 1), чтобы с использованием уже разработанного игольчатого инжектора можно было инжектировать частицы меньшего размера. Для этого было сделано следующее: инжектор частиц на основе медицинского шприца расположили горизонтально так, чтобы конец иглы входил в малое отверстие катода, но оставался заподлицо с поверхностью катода, обращенной к разрядному промежутку. При этом инъекция частиц осуществлялась горизонтально вдоль оси тлеющего разряда постоянного тока. Косой срез, имеющийся у медицинских игл, был отрезан. Внутрь шприца был введен искровой газоразрядный промежуток, подключенный к генератору БИНГ-5 [12] высоковольтных импульсов амплитудой 10 кВ и длительностью фронта 5 нс. Таким образом, при возникновении импульсного искрового разряда внутри шприца создава-



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — соединяющая шина; 2 — положительный электрод, подключенный к выходу генератора БИНГ-5; 3 — подставка; 4 — инжектор пылинок; 5 — игла; 6 — обзорное стекло; 7 — фотоприемник; 8 — катод; 9 — мишень; 10 — анод; 11 — изолятор; 12 — электрод; 13 — частицы; 14 — ствол иглы; 15 — лазер; 16 — пылевая струя.



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов затенения лазерных лучей, полученных при давлении  $P = 750$  Торг в отсутствие разряда (стрелки здесь и ниже показывают момент срабатывания наносекундного искрового разряда).

лась ударная волна, выстреливающая пылинки из канала иглы. Подобный способ инъекции одиночных частиц в плазму описан в [13], а данный искровой источник ударного давления при давлениях  $\sim 1$  Торг и ниже был опробован нами в [14].

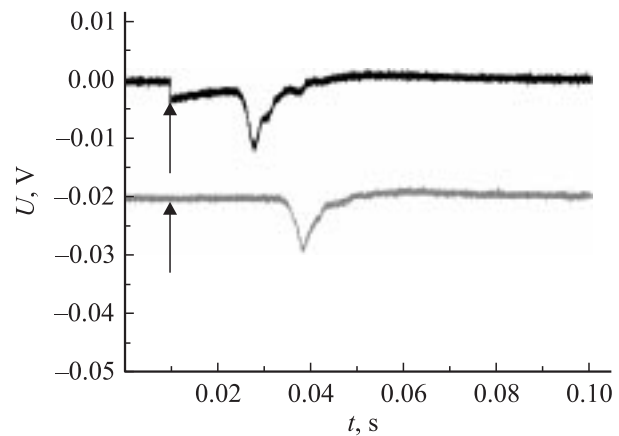
Была разработана технология заполнения канала иглы примерно одинаковыми порциями частиц (около  $\sim 10^4$  частиц). Вкратце эта технология заключается в погружении иглы на определенную глубину в емкость с частицами и в последующем проталкивании порции от конца к основанию иглы с помощью специального шомпола, имеющего диаметр, почти совпадающий с диаметром канала иглы.

Заряженный таким образом инжектор помещался в газоразрядную камеру (длина межэлектродного промежутка 450 мм, поперечное сечение камеры и электроды — квадраты со стороной 100 мм), юстировался, а затем происходила подготовка камеры к зажиганию тлеющего разряда. После установления необходимого режима горения стационарного разряда с помощью зондовой методики определялись параметры плазмы, а затем осуществлялась инъекция пылевых частиц. Ниже приведены результаты экспериментов, когда использовались диэлектрические частицы (карбид кремния) размером  $(20 \pm 5 \mu\text{m})$ , игла с диаметром канала  $200 \mu\text{m}$  и длиной 50 мм; длина порции в канале иглы составляла 7 мм, а плазмообразующим газом был воздух при давлении 1 Торг.

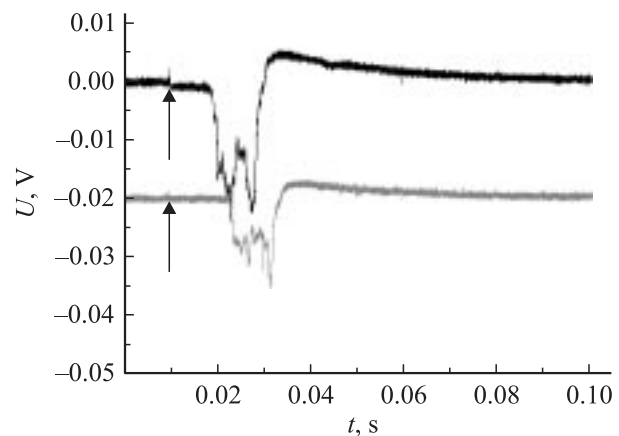
Первая серия экспериментов была направлена на измерение скорости пылевых струй. Для этого нами была применена следующая методика измерений. На расстоянии 5 и 15 мм от среза иглы предполагаемую трассу пылевой струи пересекали два лазерных луча диаметром 3 мм, созданные полупроводниковыми лазерами, непрерывно излучающими в красном свете ( $\lambda = 680 \text{ nm}$ ), мощность излучения была 3 мВт. На противоположной стороне трассы были установлены два

фотоприемника типа FD-256, сигналы с которых синхронно подавались на цифровой двухканальный осциллограф типа Tectronics TDS-3052B. В отсутствие преграды на пути лазерных лучей осциллографы прописывали постоянное смещение. При прохождении пылевой струи сквозь лазерные лучи происходило кратковременное затенение фотоприемников, что можно фиксировать на осциллограммах в виде импульсов падения напряжения. Подобная схема регистрации макрочастиц в плазме, но с помощью одного лазерного луча, была применена в [3].

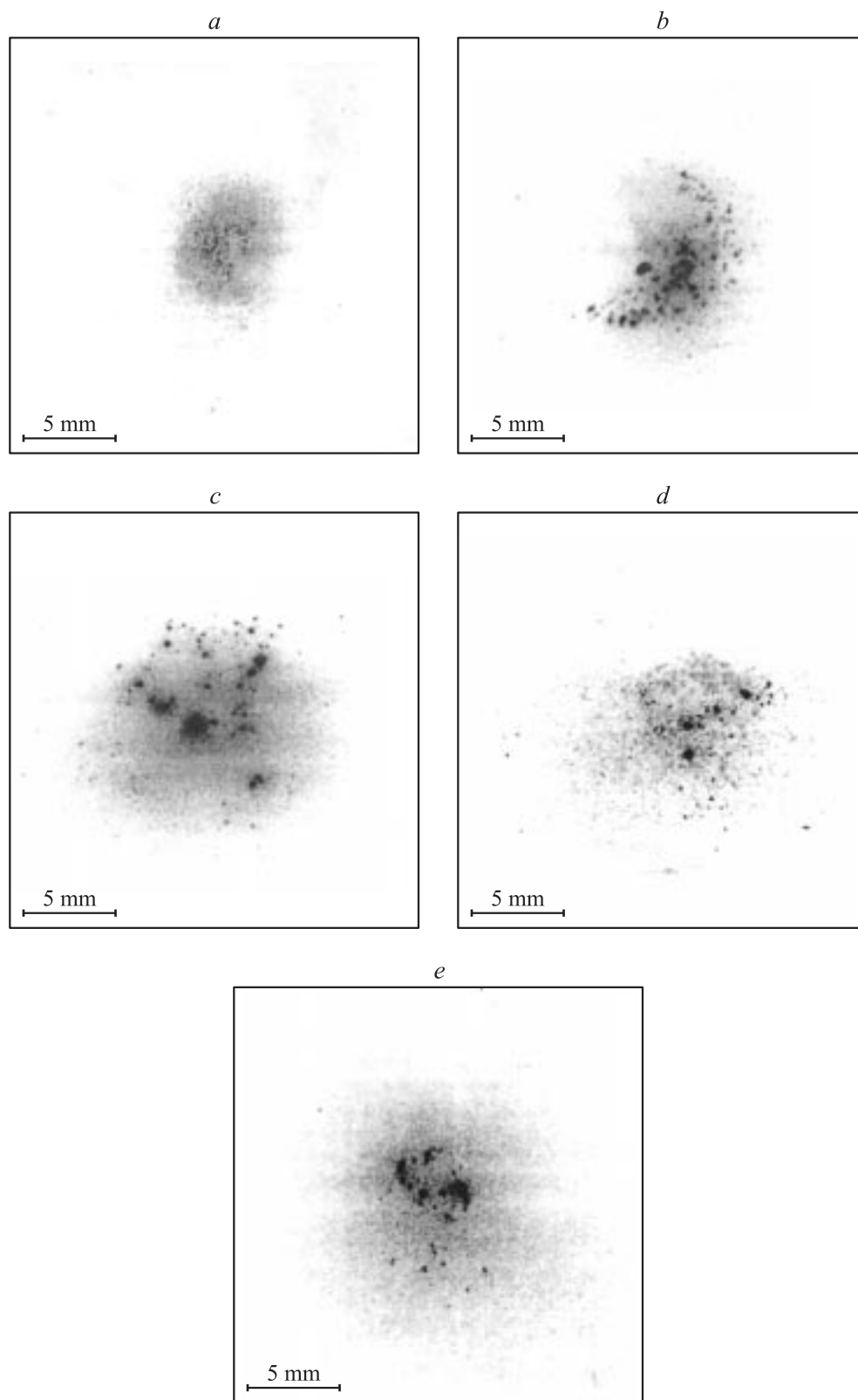
На рис. 2 представлены типичные осциллограммы пары импульсов затенения, когда инъекция осуществлялась при атмосферном давлении и в отсутствие разряда. Скорость фронта пылевой струи была оценена нами как  $\sim 10 \pm 1.5 \text{ m/s}$  (здесь и далее усреднение по результатам 10 импульсов). Такие же эксперименты в отсутствие разряда при давлении воздуха 1 Торг дали скорость фронта пылевой струи  $0.15 \pm 0.02 \text{ m/s}$  (рис. 3). Столь различные значения скорости пылевой струи при разных давлениях объясняются просто: интенсивность ударной



**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов затенения лазерных лучей, полученные при давлении  $P = 1$  Торг в отсутствие разряда.



**Рис. 4.** Осциллограммы пары импульсов затенения лазерных лучей, полученные при следующих условиях: давление  $P = 1$  Торг, разрядный ток  $I = 0.1 \text{ A}$ , концентрация электронов в плазме  $n_e = 2.6 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ , электронная температура  $T_e = 5 \text{ eV}$ .



**Рис. 5.** Отпечатки пылевых струй при  $P = 1$  Торр (*a-e*);  $I = 0$  (*a*),  $0.05$  (*b*),  $0.1$  (*c*),  $0.15$  (*d*),  $0.25 \mu\text{A}$  (*e*).

волны искрового разряда существенно уменьшается с уменьшением давления газа. Но длина струи ( $\sim 1$  см) в обоих случаях сохранялась примерно одинаковой на пролетной базе измерений, что чуть больше первоначальной длины порции пыли в канале иглы при зарядке.

На рис. 4 представлены типичные осциллограммы затемнения, когда инъекция производилась в плазму тлеющего разряда при разрядном токе 0.1 А (полученные с помощью зондовых измерений концентрация электронов —  $2.6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  и электронная температура — 5 eV). Оказалось, что скорость фронта пылевой струи в плазме равна  $0.5 \pm 0.8 \text{ ms}$ , что заметно выше, чем в неионизованном газе того же давления. Сравнение осциллограмм рис. 4 и 5 показывает, что длительность импульсов затемнения в них примерно одинакова. Это говорит о том, что пылевая струя в плазме целиком испытывает ускорение на некотором участке своего пути, а не расплывается в продольном направлении. Оценки показывают, что за ускорение заряженных пылинок может быть ответственно электрическое поле в прикатодном слое. Обращает также на себя внимание то, что осциллограммы затемнения в плазме стали более изрезанными. Это говорит о том, что в направлении своего движения в струе развивается неустойчивость, приводящая к агломерации и кластеризации частиц. По-видимому, это — неустойчивость самосжатия, описанная в [15,16] и связанная с притяжением пылинок, которое обнаружено нами в экспериментах [17] ранее. Взяв среднюю длительность микропиков на вершине осциллограмм рис. 4, можно оценить, что продольный размер пылевых агломератов составляет десятые доли миллиметра и менее.

Вторая серия экспериментов была связана с изучением поперечной структуры пылевой струи. Для этого на расстоянии 35 мм от среза иглы (т.е. на расстоянии, превышающем продольную длину струи) устанавливалась мишень размером  $37 \times 37$  мм, представляющая собой тонкую пленку с клеевым слоем, обращенным навстречу струе (использовался скотч бытового назначения фирмы „Rusi Star“). После получения отпечатка пленка с наклеенными частицами плотно без складок приклеивалась к предметному стеклу фирмы „Star Frost“ и маркировалась, после чего приобретала возможность длительного хранения до обработки. Типичное увеличение изображения отпечатка пылевой струи, движущейся в неионизованном воздухе при давлении 1 Torr, полученное регистрацией оптическим сканером с разрешением 1200 dpi, показано на рис. 5, а. Форма отпечатка — почти круг с равномерным распределением частиц со слегка спадающей концентрацией частиц от центра к периферии.

Отпечатки струй в плазме при давлении 1 Torr при различных значениях тока тлеющего разряда показаны на рис. 5, б–е. Легко видеть, что размер отпечатков струй в плазме чуть больше, чем на рис. 5, а, а их форма осталась близкой к круговой. Увеличение размеров отпечатков в плазме по сравнению с газом одинакового давления связано, по-видимому, с дополнительными

механизмами рассеяния пылинок на многочисленных плазменных осцилляциях.

Анализ отпечатков (рис. 5) позволил также обнаружить, что в поперечном сечении пылевой струи также наблюдаются процессы агломерации и кластеризации частиц. Здесь можно определить и характерные поперечные размеры пылевых агломератов — десятые и сотые доли миллиметров, так что агломераты содержат по меньшей мере от нескольких десятков до нескольких сотен пылинок.

Обнаруженная агломерация и кластеризация частиц в плазме являются прямым экспериментальным наблюдением притяжения одноименно заряженных пылинок, ранее обнаруженная лишь на их одномерных и двумерных моделях [17]. Ранее агломерация и кластеризация частиц конденсированной фазы наблюдались с частицами нанометровых размеров (например, при росте частиц кремния из газовой фазы в аргон-силановой плазме [18]), а кластеризация инжесктированных частиц размером более  $10 \mu\text{m}$  в плазме, по нашим сведениям, наблюдалась в наших исследованиях впервые.

Итак, в данной работе разработана методика изучения инъекции пылевых струй в плазму тлеющего разряда постоянного тока, измерена скорость фронта пылевых струй в плазме, которая оказалась несколько выше, чем у струи в неионизованном газе, обнаружены продольная и поперечная агломерация и кластеризация частиц в плазме, что является прямым экспериментальным наблюдением притяжения одноименно заряженных пылинок.

Работа выполнена в рамках научного гранта NWO-047.016.020.

## Список литературы

- [1] Garrity M., Peterson T.W., O'Hanlon J.F. // J. Vac. Sci. Technol. 1996. Vol. 14A. N 2. P. 550–557.
- [2] Смирнов Б.М. // ТВТ. 1993. Т. 31. № 2. С. 176–180.
- [3] Jenkins J.E., Chatterton P.A. // J. Phys. D. 1977. Vol. 10. N 3. P. L17–L24.
- [4] Бычков В.Л., Гридин А.Ю., Климов А.И. // ТВТ. 1994. Т. 32. № 2. С. 190–194.
- [5] Fortov V.E., Nefedov A.P., Torchinsky V.M. et al. // Phys. Lett. A. 1997. Vol. 229. N 5. P. 317–322.
- [6] Misconi N.Y. // Laser. Particle Beams. 1996. Vol. 14. N 3. P. 501–510.
- [7] Shoji T., Fujigaya M., Tomita H. // Physica Scripta. 2001. Vol. T89. P. 41–44.
- [8] Xu W., D'Angelo N., Merlino R.L. // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. N A5. P. 7843–7847.
- [9] Barkan A., D'Angelo N., Merlino R.L. // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 73. N 23. P. 3093–3098.
- [10] Бульчев С.В., Дубинов А.Е., Жданов В.С. и др. // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 6. С. 19–26.
- [11] Бульчев С.В., Дубинов А.Е., Кудасов Ю.Б. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 15. С. 45–48.
- [12] Kudasov B.G., Pavlov S.S., Tananakin V.A. et al. // Proc. IEEE 11<sup>th</sup> Intern. Pulsed Power Conf. Baltimore (Maryland, USA), 1997. P. 1572–1574.

- [13] Асаналиев М.К., Жеенбаев Ж.Ж., Самсонов М.А., Энгельшт В.С. // Физ. и хим. обраб. матер. 1978. № 3. С. 65–71.
- [14] Dubinov A.E., Sadovoy S.A., Selemir V.D. // Shock Waves. 2000. Vol. 10. N 1. P. 73–76.
- [15] Цытович В.Н., Резендес Д. // Физика плазмы. 2000. Т. 24. № 1. С. 71–82.
- [16] Дубинов А.Е., Селемир Д.В., Шайдулин В.Ш. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 17. С. 84–89.
- [17] Дубинов А.Е., Жданов В.С., Игнатов А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 13. С. 73–80.
- [18] Buss R.J., Babu S.V. // J. Vac. Sci. Technol. 1996. Vol. 14A. N 2. P. 577–581.