

УДК 539.173; 539.9

## АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ В ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ, СОЗДАВАЕМОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ ГАЗОПЫЛЕВЫХ СМЕСЕЙ ПУЧКОМ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ

© Сергей Владимирович Бажал, Александр Иванович Глотов,  
Николай Иванович Дудкин, Александр Александрович Исаков,  
Владимир Иванович Мешакин, Павел Игоревич Прудников,  
Владимир Александрович Рыков

ГНЦ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск, Россия  
[meshakin@ippe.ru](mailto:meshakin@ippe.ru); [bazhal@ippe.ru](mailto:bazhal@ippe.ru)

***Аннотация:** Экспериментально исследована динамика микрочастиц в пылевой плазме, полученной ионизацией газопылевых смесей узконаправленным пучком ионов высокой энергии перезарядного электростатического ускорителя. Изучены условия самоорганизации пылевых частиц и типы образующихся плазменно-пылевых структур в зависимости от давления плазмообразующего газа. Экспериментальные видеоизображения траекторий пылевых частиц обработаны с помощью вейвлет-анализа. Получены уникальные данные о поле скоростей одиночных частиц в пылевых структурах, а также данные о коллективном движении всего ансамбля микрочастиц при спонтанном возникновении и распространении волн плотности в пылевых структурах.*

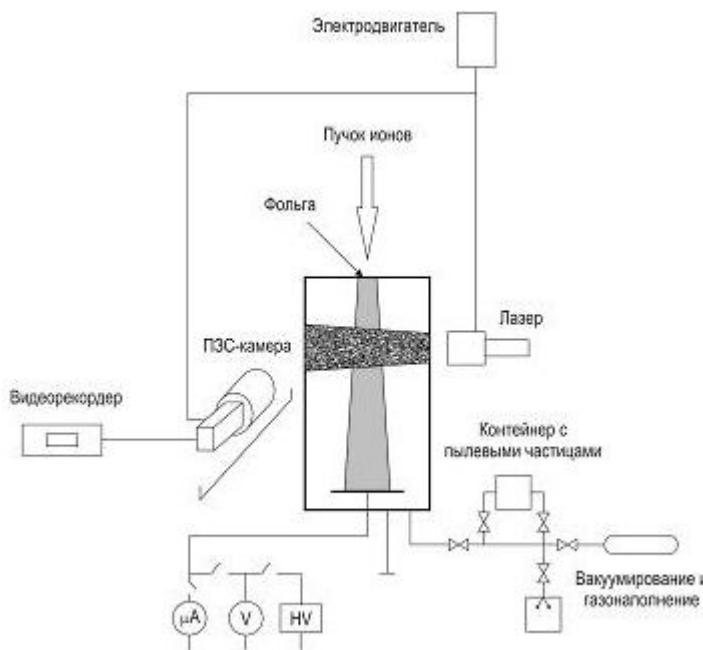
***Ключевые слова:** пылевая плазма, перезарядный электростатический ускоритель, ионный пучок, плазменно-пылевая структура, пылевой кристалл, вейвлет-анализ.*

**1. Введение.** Использование ускоренных ионов для создания пылевой плазмы значительно улучшает условия эксперимента по сравнению с опытами, в которых плазма образуется при ионизации газа частицами радиоактивного источника или осколками деления, получаемыми при облучении нейтронами аэрозоля, состоящего из соединений урана и других делящихся элементов [1-3]. Диапазон энергий ускоренных ионов 1-20 МэВ примерно соответствует энергетическому диапазону продуктов радиоактивного распада или деления ядер. В этом случае пучок ионизирующих частиц обладает малой расходимостью, а ток пучка можно сделать достаточно большим для того, чтобы треки ионов имели за время своего существования значительное перекрытие – плазма становится квазиоднородной.

В ранних экспериментах, выполненных с широкоапертурными ионными пучками, нами были получены различные плазменно-пылевые структуры квазистатического (пылевой облако, пылевой кристалл) [4,5] и динамического типов (стратифицированный пылевой вихрь [6]). Тип структур слабо зависит от материала пылевых микрочастиц и сорта плазмообразующего газа, а, в основном, определяется давлением. В этих структурах отдельные пылевые частицы участвуют в сложном коллективном колебательном и вращательном движении, анализ которого затруднен по ряду причин (несовершенство оптики, цифровой шум регистрирующей аппаратуры и др.).

Поведение пылевой компоненты в плазме, создаваемой узкоапертурным пучком ускоренных ионов практически не изучено. Особенностью такого эксперимента является наличие области сильного энерговыделения на оси пучка, что вызывает дестабилизирующее воздействие на процесс самоорганизации пылевых частиц. В настоящей работе приведены результаты таких исследований. Также были изучены возможности вейвлет-анализа оцифрованных записей видеоизображений для выделения траекторий отдельных пылевых микрочастиц на фоне шумов. Одновременное определение поля координат и поля скоростей микрочастиц в пылевой плазме вызывает большой интерес в области фундаментальных исследований и для практического использования в плазменных и пучковых технологиях.

**2. Описание эксперимента.** Эксперименты проводились на электростатическом ускорителе ЭГ-2,5 [1] и перезарядном электростатическом ускорителе ЭП-15 ГНЦ РФ – ФЭИ. Ускорители позволяли получать непрерывные пучки протонов с энергией до 2,5 МэВ или тяжелых ионов с энергией до 20 МэВ. Ток пучка варьировался от 0,2 мкА до 5 мкА. Поперечный диаметр пучка составлял 3 мм. Экспериментальная ячейка имела форму куба размером 250×250×250 мм<sup>3</sup>. Ионный пучок вводился внутрь ячейки сверху через фольгу и диафрагму диаметром 8 мм. Схема экспериментальной установки приведена на Рис.1.



**Рис.1.** Схема экспериментальной установки

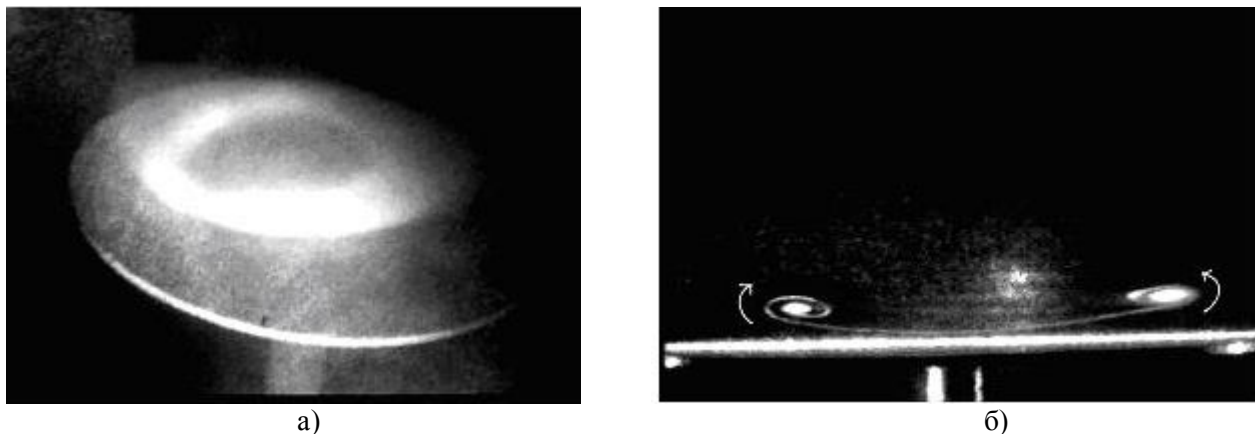
Боковые грани ячейки являлись стеклянными окнами, через которые осуществлялась подсветка плоским лазерным лучом He-Ne лазера (длина волны 655 нм, ширина перетяжки 300 мкм) и велось наблюдение за поведением пылевых структур с помощью ПЗС-телекамеры. В нижней части ячейки располагался плоский круглый электрод диаметром  $D=60$  мм. Геометрический центр электрода совпадал с осью ионного пучка, расстояние между диафрагмой и электродом составляло 70 мм. Ток пучка составлял 1 мкА. В ходе эксперимента напряжение на электроде варьировалось в пределах от 0 В до - 500 В.

Газопылевая смесь внутри ячейки создавалась после ее вакуумирования с помощью резкого импульсного воздействия потока напускаемого в ячейку газа, поступающего из дозатора с фиксированным объемом, на контейнер с пылевыми частицами. Использовались монодисперсные частицы из меламинформальдегида с диаметром  $d = 3$  мкм, в качестве плазмообразующего газа использовались Ar, Kr, Xe.

**3. Структуры пылевых микрочастиц и вейвлет-обработка движений отдельных пылинок.** В зависимости от величины давления газа в ячейке получались различные пылевые структуры из микрочастиц. В частности, в газе Xe, при давлении 85 Торр и напряжении на электроде -50 В вблизи поверхности электрода образовалась спиралевидная пылевая структура. На Рис.2 (а) приведен вид структуры сверху под углом 45<sup>0</sup>, при этом подсветка осуществляется лазерным “ножом”, направленным параллельно плоскости электрода, поэтому структура на данном кадре выглядит торообразной. Если рассмотреть эту же структуру в срезе, перпендикулярном плоскости электрода, как показано на Рис.2 (б), то

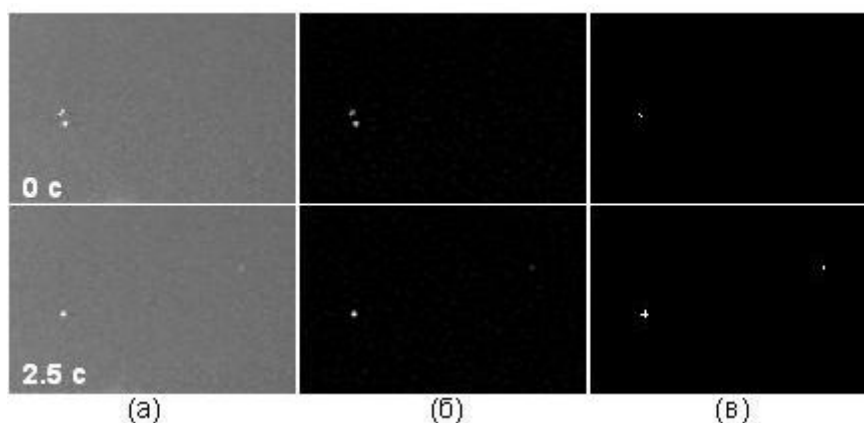
становится понятно, что структура имеет форму чаши с закручивающейся по спирали “каемкой” в виде кольца.

При этом частицы в структуре находятся в постоянном движении – по дну “чаши” они разбегаются в разные стороны от центра электрода, а на краях структуры, поток частиц приобретает вид вихря, закручивающегося по спирали. Подобные структуры удавалось получить и в других газах – в частности, в газе Кг при давлении 240 Торр и напряжении на электроде -125В.



**Рис. 2.** а) – спиралевидная пылевая структура; б) – вид той же структуры в разрезе, плоскость лазерного “ножа” проходит через центр электрода перпендикулярно к его плоскости, стрелками показано направление движения частиц внутри структуры.

Пылевая структура на Рис.2. существовала длительное время, составляющее несколько десятков минут. При этом на протяжении всего времени существования, структура постепенно теряла пылевые частицы. В результате, спустя 2,5 часа с момента образования исходной структуры, в плоскости лазерной подсветки осталось всего несколько пылинок. На рис.3 показаны два кадра видеозаписи, когда в плоскости лазерной подсветки зарегистрированы всего две пылевые частицы, чьи орбиты не выходили из плоскости лазерного ножа на протяжении десятков циклов.



**Рис.3.** Две пылевые частицы – одна колеблется около положения равновесия, другая движется по протяженной эллиптической орбите. а) – исходные кадры, фиксирующие положение частиц с временным интервалом в 2,5 секунды; б) – картины вейвлет-коэффициентов, соответствующие исходным кадрам; в) – выделение двух локальных максимумов из вейвлет-спектра, указывающих положение пылевых частиц

Для улучшения качества видеоизображений пылевых частиц в плазменно-пылевых структурах был применен вейвлет-анализ, широко использующийся при обработке сигналов различной природы на фоне шумов [7]. В основе вейвлет-анализа лежит непрерывное вейвлет преобразование, которое для двумерного случая записывается в следующем виде:

$$W(a_x, a_y, b_x, b_y) = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \psi\left(\frac{x-b_x}{a_x}, \frac{y-b_y}{a_y}\right) dx dy, \quad (1)$$

где  $W(ax, ay, bx, by)$  — совокупность вейвлет-коэффициентов, несущая всю информацию об исследуемом сигнале  $f(x, y)$ ;  $\Psi(x, y)$  — базовая анализирующая вейвлет-функция (или просто вейвлет), которая должна принадлежать множеству  $L^2$  и иметь нулевое среднее значение;  $a_x, a_y$  — параметры, задающие масштаб преобразования по осям  $x$  и  $y$  соответственно;  $b_x, b_y$  — параметры, задающие сдвиг анализирующего вейвлета в плоскости  $xy$ ;  $C$  — константа, зависящая от масштаба преобразования. На рис.4 приведен пример двумерного вейвлета для функции

$$g(r) = (1 - r^2) \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right), \quad r^2 = x^2 + y^2. \quad (2)$$

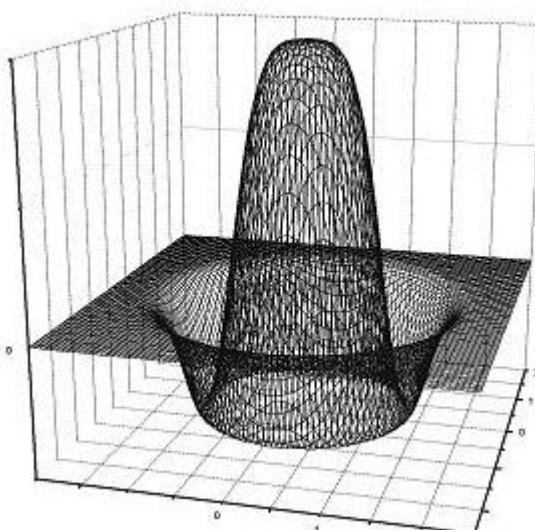


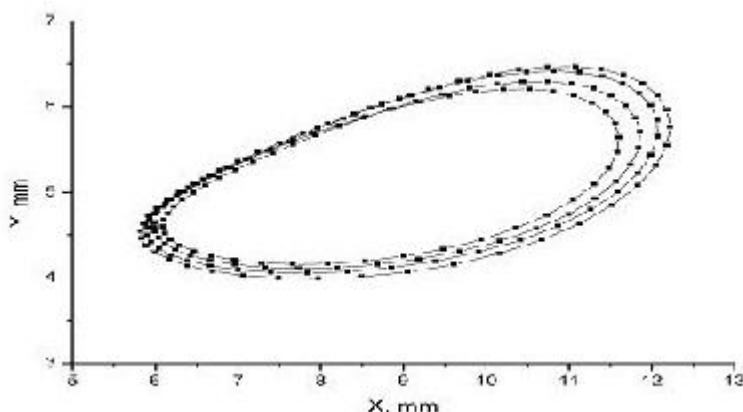
Рис.4. Двумерный МНАТ-вейвлет.

Значение анализируемой функции  $f(x, y)$  определяется яркостью пикселя изображения с экранными координатами  $(x, y)$ .

Вейвлет-анализ позволяет, варьируя масштаб преобразования (параметры  $a_x, a_y$ ) и тип анализирующей вейвлет-функции  $\Psi(x, y)$ , выявлять на изображении объекты соответствующего размера и структуры, а параметры сдвига ( $b_x, b_y$ ) однозначно определяют положение этих объектов на исходном изображении. Такой многомасштабный анализ можно представить как математический микроскоп, позволяющий изучать интересные объекты на изображении, не обращая внимания на различного рода помехи.

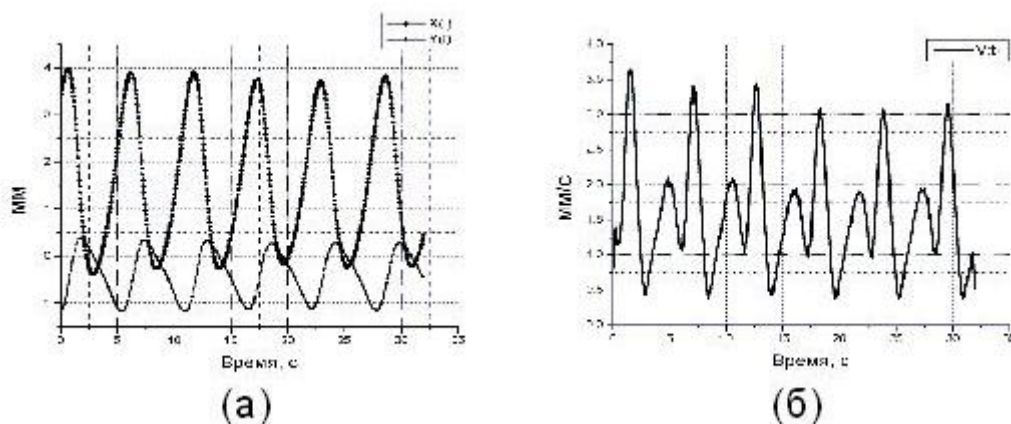
На Рис.3 (б) приведен результат вейвлет-преобразования исходных кадров (яркость пикселя на изображении вейвлет-спектра пропорциональна величине соответствующего вейвлет-коэффициента). На Рис.3 (в) обозначены сильно выделяющиеся на вейвлет-спектре два локальных максимума — координаты этих точек можно рассматривать как координаты пылинок на исходном изображении. Таким образом, был получен способ отслеживания

положения отдельных пылинок на каждом видеокadre, несмотря на то, что каждый отдельно взятый кадр является далеко не идеальным изображением.



**Рис.5.** Оцифрованная траектория движения фиксированной пылевой частицы в спиралевидной пылевой структуре.

Описанным способом была получена оцифрованная траектория движения фиксированной микропылинки. На Рис.5 показано координатное поле для траектории из четырех витков. Применяя численное дифференцирование координат частицы по времени (частота видеокadров стандартная,  $25 \text{ c}^{-1}$ ), было получено поле скоростей пылевой частицы. Временные зависимости координат и модуля скорости показаны на Рис. 6.

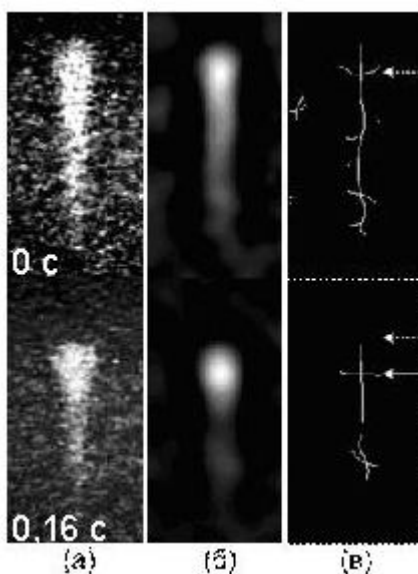


**Рис.6.** Временные зависимости: а) – плоских координат частицы; б) – модуля скорости частицы

На графике (Рис. 6) координаты движущейся частицы отсчитываются относительно положения частицы, которая находилась практически в состоянии покоя.

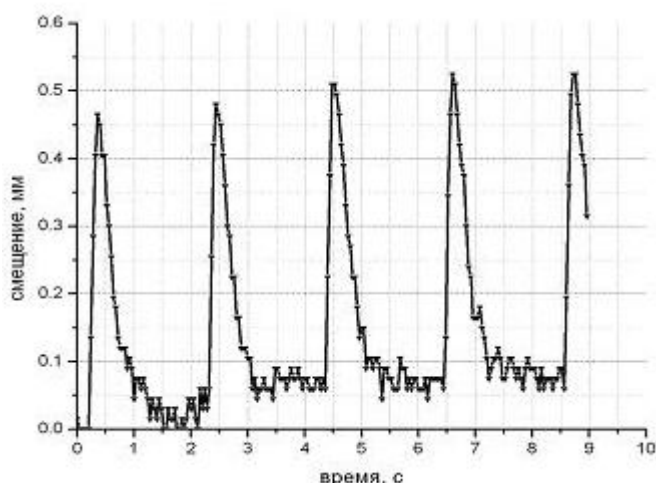
Отработанная методика была применена для анализа более сложного, коллективного движения ансамбля микрочастиц в плотной пылевой структуре (Рис.7). Данная структура образовалась в области пучка ускоренных протонов, вдоль его вертикальной оси. Условия эксперимента при этом были следующие – газ Ne, давление 6 Торр, напряжение на электроде  $-80 \text{ В}$ . Структура имеет форму конуса, а ее высота составляет порядка 3 мм. Периодически наблюдались колебания плотности пылевой компоненты, которые в виде волны проходили

по структуре сверху вниз. При этом условия эксперимента (параметры пучка, давление газа и напряжение на электроде) оставались неизменными.



**Рис.7.** Распространение колебаний плотности пылевой компоненты. а) – исходные кадры, запечатлевшие одну и ту же пылевую структуру в разные моменты времени (временной интервал 0,16 с); б) – картины вейвлет-коэффициентов, соответствующие исходным кадрам; в) – выделение линий локальных экстремумов на вейвлет-спектре, позволяющих отследить смещение фронта структуры

На Рис.7 (а) приведены исходные кадры с плотной пылевой структурой. На Рис.7 (б) и Рис. 7(в) приведены результаты вейвлет преобразования исходных кадров со структурой и результат выделения на вейвлет-спектре линий локальных экстремумов (так называемые “скелетоны”), соответственно. Такие скелетоны позволили оценить величину смещения верхней границы пылевой структуры при возникновении волны. Результаты обработки приведены в виде временной зависимости на Рис.8.



**Рис.8.** Зависимость смещения верхней границы пылевой структуры от времени относительно начального положения

**Выводы.** В результате проведенных экспериментов удалось наблюдать новые интересные явления, связанные с самоорганизацией пылевой компоненты в плазме, полученной ионизацией газопылевых смесей сфокусированным пучком ускоренных ионов. При давлениях порядка 100 Торр были получены протяженные спиралевидные структуры, поперечный размер которых в несколько раз превышал диаметр пучка. При низких давлениях были получены квазистатические образования из пылевых частиц, сильно вытянутые в направлении оси пучка. При этом в самой структуре все время возникали неустойчивости, связанные с самопроизвольным возникновением и нарастанием волн плотности.

Показано, что применение вейвлет-анализа для обработки экспериментальных видеоизображений позволяет получить поле пространственных координат и поле скоростей отдельных микрочастиц в пылевых структурах, а также исследовать коллективные колебания (волны плотности) в них.

*Исследования проведены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного контракта от 26.08.2011 № 16.518.11.7085.*

### Литература

1. Фортов В.Е., Рыков В.А., Владимиров В.И., Депутатова Л.В., Нефедов А.П., Худяков А.В. Пылевые вихри, облака и струи в ядерно-возбуждаемой плазме//ЖЭТФ, 2001, Т. 120, вып.2(8), С. 353-365.
2. Vladimirov V.I., Deputatova L.V., Molotkov V.I., Nefedov A.P., Filinov V.S., Fortov V.E., Rykov V.A., Khudyakov A.V. Ordered dusty structures in nuclear-track neon and argon plasmas//Plasma Physics Reports. 2001. V. 27. No 1. P. 36-43.
3. Rykov V.A., Khudyakov A.V., Filinov V.S., Vladimirov V.I., Deputatova L.V., Krutov D.V., Fortov V.E. Dynamic vortex dust structures in a nuclear-track plasma//New Journal of Physics. 2003. V. 5. No 1. P. 129.
4. Fortov V.E., Filinov V.S., Deputatova L.V., Vladimirov V.I., Molotkov V.I., Rykov V.A., Budnik A.P., Rykov K.V., Zrodnikov A.V., Dyachenko P.P. Experimental and theoretical investigations of dust crystals in plasma created by proton beam//Physics Letters A. 2006. V.351. P.296-301
5. Fortov V.E., Filinov V.S., Deputatova L.V., Vladimirov V.I., Molotkov V.I., Rykov V.A., Budnik A.P., Rykov K.V., Zrodnikov A.V., Dyachenko P.P. Dust crystals in plasma created by a proton beam// Journal of Physics A: Mathematical and General. 2006. V.39. №17. P. 4533-4537.
6. Фортов В.Е., Рыков В.А., Филинов В.С., Владимиров В.И., Депутатова Л.В., Петров О.Ф., Будник А.П., Дьяченко П.П., Рыков К.В., Худяков А.В. Вихревые структуры пылевых частиц в трековой плазме пучка протонов//Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 7. С. 621-627.
7. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и некоторые приложения. // УФН. 1996. Т.166. №11. С. 1145-1170.

*Поступила: 17.06.12.*