УДК 621.382, 621.039, 533.95

МИКРОПЫЛЕВЫЕ КАРКАСНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ КАК НОВЫЙ ТИП НАНОМАТЕРИАЛА

А.Б. Кукушкин, В.А. Ранцев-Картинов ИЯС РНЦ «Курчатовский Институт»

Аннотация. Дан краткий обзор широкого круга экспериментальных данных, позволивших обнаружить явление долгоживущих филаментарных структур в плазме в различных типах электрического разряда (токамаки, Zпинчи, плазменный фокус, вакуумная искра, плазма лазерного факела), а также результатов экспериментов (наноструктурный анализ пылевых осадков и диагностика начальной фазы электрического разряда) по проверке предложенной гипотезы о микропылевой природе таких филаментов. Дан краткий обзор основных гипотез об образовании микропылевых каркасов из (углеродных) нанотрубок в различных типах электрического разряда и предполагаемых свойств таких каркасов как нового типа ультрадисперсных (нано-)материалов, который уместно назвать каркасным наноматериалом. Указано на корреляцию ожидавшихся нами свойств таких наноматериалов с новейшими данными в физике наноструктур.

1. Введение

Настоящая работа представляет собой результат первоначально плазмофизических исследований, вышедших междисциплинарное В пространство. «Пограничный» характер работы объективным явился следствием развития исследований авторов в 1993-1997 гг. (см. [1-9]) по анализу широкого массива экспериментальных данных, накопленных в процессе многолетних исследований по физике горячей плазмы и проблеме

управляемого термоядерного синтеза в РНЦ «Курчатовский Институт» для различных типов электрического разряда (токамаки, Z-пинчи, плазменный фокус). Оказалось, что объяснение результатов вышеуказанного анализа потребовало [10-12] выхода за существующие традиционные рамки физики горячей плазмы и работы на стыке ряда различных областей науки. Сюда относятся следующие дисциплины:

- недавно возникший раздел физики плазмы физика пылевой плазмы, притом в ее дополнительной, новой версии, а именно плазмы с микропылевыми <u>каркасными (</u>т.е. связными, «конденсированными») структурами, а не только с уединенными кулоновски-многозарядными пылевыми микрочастицами;
- новый, бурно развивающийся раздел физики конденсированных сред, а именно физика нанообъектов, в первую очередь - углеродных нанотрубок (включая также и их предшественников - фуллерены, а также возможные аналогичные наноструктуры из других химических элементов);
- физика электрического пробоя в различных средах в ее обновленной и расширенной версии, а именно с учетом возможной ключевой роли микропыли;
- физика явлений на поверхности конденсированных сред (прежде всего твердых тел) в присутствии *мощных динамических* электромагнитных полей;
- и наконец, физика ультрадисперсных (нано-)материалов и ее различные приложения к материаловедческим и технологическим проблемам микросистемной техники (МСТ).

Настоящая работа излагает и проецирует концепцию о *микропылевых каркасных структурах* [10-12] на область прикладных задач, указывая при этом на возможность рассматривать такие структуры как новый тип наноматериала (под наноматериалами понимаются такие, свойства которых определяются их составными блоками с размерами в нанометровом

диапазоне). В настоящей работе приведен краткий аннотационный обзор феноменологии этого явления в плазме сильноточных электрических разрядов (раздел 2), основных гипотез (о микропылевых каркасах из квантовых наноструктур), выдвинутых для объяснения этого явления (раздел 3), подтверждений этих гипотез, полученных либо в недавних экспериментах (наноструктурный анализ пылевых осадков в токамаке и диагностика начальной фазы электрического разряда в вакуумной искре), либо путем баз предшествующих экспериментов анализа данных (диагностика начальной фазы электрического разряда в плазменном фокусе и токамаке) (раздел 4); новейших данных по физике наноструктур и наноматериалов, коррелирующих с их гипотетическими свойствами, ранее использованными в вышеупомянутых гипотезах о каркасных структурах (раздел 5); основных задач дальнейшей экспериментальной проверки концепции и связи этих задач с проблемами МСТ (раздел 6).

2. Основная феноменология

Нами проведен анализ обширной базы экспериментальных данных, что позволило обнаружить и изучить явление долгоживущих филаментарных структур в различных типах электрического разряда (как правило - сильноточного); это, в частности, включает

- газовые Z-пинчи [1-3,10-12,13(е)],
- плазменный фокус [5-9,13(e)],
- токамаки [4,11,13,14],
- плазму лазерного факела [11,16],

а также аналогичные филаментарные структуры в космосе [1,2,10-12].

2.1. Обнаружены протяженные нити (т.н. филаменты) повышенной (или пониженной) светимости, обладающие двумя характерными свойствами:

(а) правильной геометрической формой (элементарным и наиболее интересным блоком которых является прямолинейное трубчатое

образование, часто обладающее коаксиальной внутренней структурой, подробнее см. подраздел 4.1), и

(б) временем жизни, сравнимым с длительностью всего разряда, что значительно (порой на порядки величин!) превосходит соответствующие теоретические предсказания для времени жизни таких структур.

Конкретный пример долгоживучести длинного прямого филамента, направленного поперек основному электрическому току Z-пинча, представлен на рис. 1 в [12] (подробнее см. ниже подраздел 4.1).

Структуры, обладающие свойствами (а) и (б), были названы нами *долгоживущими* филаментами - для «отстройки» от достаточно широко изучаемого явления хаотической, мерцающей филаментации (т.е., в указанном выше контексте - короткоживущей).

2.2. Обнаружено *топологическое подобие* структур (среди которых были также и трубчатые) в необычайно широком диапазоне (а) пространственных масштабов (от микрометровых диаметров отдельных филаментов в лабораторных разрядах до структур галактического масштаба и даже более), (б) плотностей макроскопического электрического тока, (в) типа удержания плазмы - магнитного (токамаки) или инерционного (Z-пинчи, плазменный фокус, плазма лазерного факела). В целом ряде случаев удалось обнаружить у характерных структур их *самоподобие*, т.е. составленность большей структуры из аналогичной структуры меньшего или много меньшего размера.

3. Основные гипотезы

3.1. На основании наблюдаемой долгоживучести прямолинейных структур выдвинута гипотеза [10-12] о наличии у наблюдаемых долгоживущих филаментов жестких *каркасов* и о том, что только некие *квантовые* связи в конденсированной среде (а не просто взаимодействие *классических* частиц в плазме) могут обеспечить наблюдаемую «жесткость»

(или по меньшей мере, связность) блоков таких каркасов. При этом образование связной (на определенном пространственном масштабе - твердотельной) структуры должно происходить в процессе электрического пробоя и, следовательно, *предшествовать* образованию горячей плазмы.

3.2. Конкретным кандидатом на роль элементарного блока В гипотетических каркасах была предложена углеродная нанотрубка (или аналогичные наноструктуры из других химических элементов и их соединений, способных строить такого рода структуры) [10-12]. Причиной такого выбора явился целый ряд физико-химических свойств нанотрубок, которые В совокупности открывают возможность новой формы электрического пробоя (не обязательно в присутствии газа), состоящей, по сути, в строительстве каркасных структур из микропыли, либо уже присутствующей в разряде (например, вследствие наработки нанотрубок при очень часто практикуемой предварительной «тренировке» разряда), либо образующейся в процессе самого пробоя. Из важнейших свойств нанотрубок укажем здесь только следующие два: во-первых, уже довольно хорошо изученную к 1998 году (см. напр., обзор [17]) аномальную эмиссию электронов (как эмиссию во внешнем электрическом поле, так и тепловую), что значительно упрощает процесс электрического пробоя и скорее всего способно снять неизменно острую проблему «затравочных» электронов в теории электрического пробоя, и во-вторых, (к 1998 году еще слабо изученные) аномальные магнитные свойства, которые позволили бы, вопритяжением первых, взаимным магнитным отдельных нанотрубок выстраивать из них (в динамических внешних полях) фрактальные каркасные структуры и, во вторых, интенсивным электромагнитным волнам «скользить» вдоль таких каркасов с аномально малой диссипацией энергии этих волн (см. ниже подраздел 3.3).

3.3. Для разрешения основного парадокса в предлагаемой выше картине, а именно возможности существования фрактальной конденсированной

(макромолекул) внутри горячей среды плазмы, вплоть ДО килоэлектронвольтных температур и выше (что кардинально отличает рассматриваемую нами задачу от решаемых задач в физике обычной, «кулоновской» пылевой плазмы), нами выдвинута гипотеза о том, что обнаруженные нами долгоживущие филаментарные структуры (особенно прямолинейные филаменты, направленные поперек относительно основного электрического тока) являются «естественными кабелями», существующими вследствие каналированного транспорта электромагнитной энергии, накачиваемой из внешней электрической цепи и распространяющейся вдоль гипотетических микротвердотельных каркасов в центр плазмы в виде образующихся высокочастотных (ВЧ) электромагнитных волн [13]. Именно такие ВЧ волны способны защитить (градиентом давления ВЧ поля, т.е. так называемой силой Миллера) каркасы воздействия OT окружающей высокотемпературной плазмы (оказывается [13(b,d,f)], например, что зарегистрированные в токамаке Т-10 [18-20] частотные и амплитудные характеристики ВЧ волн обладают требуемыми для этого свойствами, и аналогичная ситуация имеет место и в газовом Z-пинче [13(е)] для спектроскопически диагностированных там ВЧ волн [21]). Таким образом, модель «естественных кабелей» предлагает общее и взаимосвязанное решение для следующих двух проблем:

(а) выживания микропылевых каркасов в горячей плазме, и

(б) существования нелокального (недиффузионного, в частности баллистического) механизма (см. [14,22]) переноса тепла в горячей плазме (наличие нелокальной компоненты переноса тепла в токамаках было обнаружено в последнее десятилетие в целом ряде экспериментов на различных установках, см. обзор [23]).

4. Проверка гипотез

4.1. Прежде всего отметим, что работа по проверке гипотез [10-12], выдвинутых на основании анализа предшествующих результатов [1-9], расширением массива сопровождалась как самого анализируемых экспериментальных данных, так и углублением их анализа. Поэтому проверки гипотез оказалось обнаружение тонкой составной частью структуры филаментарных структур. Так было показано наличие длинных прямых трубчатых филаментов с коаксиальной внутренней структурой, длиной в несколько сантиметров и более, часто направленных примерно по радиусу плазменного шнура. Еще более важным элементом стало обнаружение структуры типа тележного колеса (а именно, кольца с прямыми радиальными связями, часто - двумя и более коаксиальными кольцами на единой осевой стержневой структуре, см. рис. 1(а) на 3-ей странице обложки). Такая структура уже сама по себе (даже не принимая во внимание ее аномальную долгоживучесть) практически необъяснима газо- или гидродинамической картиной.

Указанные структуры были найдены [13(a,c,f)] в базах данных ряда токамаков (исследованные нами изображения плазмы получены в токамаках ТМ-2, Т-4, Т-6 и Т-10), газового Z-пинча [13(a,e)] (подробнее см. ниже), плазменного фокуса [13(e)] (данные получены на установке ЛВ-2 в Курчатовском институте [24], являвшейся плазменным фокусом типа Филиппова), лазерного факела [16] (данные получены в экспериментах в ТРИНИТИ, см. напр. [25]).

Важно отметить, что надежность всех упоминаемых в настоящей работе результатов обеспечивается богатой статистикой обнаруженных структур, значительной степенью их подобия в различных режимах и различных установках, а также независимостью обнаруженной структуризации от способа получения изображений. Так, изображения плазмы в видимом свете были получены с высоким разрешением с помощью различных методов: скоростного фотографирования, щелевой фоторазвертки, электронного

преобразователя (ЭОП). Исходные оптического изображения обрабатывались методом многоуровнего динамического контрастирования (МДК) [1,2]. Однако, как правило, наличие структур легко обнаружить и без использования метода МДК, если контраст этих структур достаточно высок. В таких случаях достаточно просто увеличить (порой значительно) исходное изображение, а использование МДК позволяет выявить тонкие детали структур. Как правило, конечные изображения получались из исходных при использовании «однородной» карты контрастирования, т.е. одной и той же для всего изображения (в общем случае карта контрастирования это некая зависимость $I_1(I_0)$, указывающая, что конкретное значение I_0 почернения изображения должно быть заменено во всех точках, где такое значение встречается, на величину I₁). Надежное же распознавание структуризации требует [1,2] переменной (т.е., «дышащей», «динамической») карты контрастирования, чтобы избежать артефактов и отобрать оптимальное окончательное изображение.

Для иллюстрации структурных свойств основных каркасных образований мы приведем несколько характерных данных для случая Zпинча. На рисунке 2(а) (см. 3-ю страницу обложки) и рисунках 3,4 приведены данные экспериментов, ранее проведенных одним из авторов (В.А.Р.-К.). Основные параметры установки и электрических разрядов в ней были следующими: расстояние между электродами 60 см, диаметр камеры 20 см, энергозапас ~30 кДж, максимальный ток в разряде ~ 150-350 кА, рабочий газ - дейтерий, давление ~1-10 Торр, начальное напряжение ~30 кВ. (подробнее условия экспериментов см. в [1,3]). Система оптической регистрации фиксировала собственное свечение плазмы и выделяла фокусировкой слой (шириной 7,5 см и толщиной 5 см) на оси Z-пинча. Характерной особенностью всех данных является их высокое разрешение, как временное (экспозиция 2-60 нс), так и пространственное (вплоть до десятков микрон), а также наблюдение в различные моменты времени с

различных позиций (время, указанное на рис. 2(а),3,4, отсчитывалось от главной особенности на осциллограмме производной разрядного тока). Последнее собственно и позволило проследить эволюцию жесткого прямого образования спицеобразной формы в течение времени, сравнимого с временем всего разряда и, что особенно важно, превышающего на порядки величин соответствующие теоретические предсказания для поддержания своей формы такой прямолинейной структурой, направленной поперек основному электрическому току в Z-пинче и значительно выходящей за собственно Z-пинча (т.е. более пределы плотного, вертикальнонаправленного плазменного столба) (см. рис. 1 в [12]). Напомним, что обычный механизм пинчевания состоит в сжатии электропроводящих структур (в частности, плазмы) магнитным полем, самосогласованно создаваемым протекающим по нему электрически током. Такой механизм способен только «оголить» наблюденную спицеобразную структуру (и все остальные каркасные структуры в разрядной камере), но никак не обеспечить ее устойчивость. Наличие оголенного каркаса иллюстрирует рис. 2(a) на 3-ей странице обложки, изображение на котором получено как раз вблизи момента главной особенности (т.е. t = 0), когда вследствие развития неустойчивости (типа Релея-Тейлора, как правило аксиально несимметричной) магнитное поле создает сначала «перетяжку» на вертикально направленном плазменном шнуре, а затем вытесняет плотную, ярко светящуюся плазму из этой перетяжки.

Другой пример наличия сложной каркасной структуры из трубчатых блоков дан на рис. 3. Здесь первичное изображение обработано методом многоуровневого динамического контрастирования (МДК) [1,2] с различной центральной и периферийной картой контрастирования В секциях необходимо изображения (различие карт для прослеживания преемственности структур в областях с сильно различающимся уровнем Различимость фоне светимости). структур на достаточно сильного

собственного свечения плазмы обусловлена оптической неоднородностью, создаваемой такими структурами. Поэтому филаменты видны как обладающие пониженной светимостью по сравнению с более ярким фоновым излучением плазмы Z-пинча. Более детально структуру радиальных филаментарных структур можно рассмотреть на рис. 4.

На Рис. 5 показано наличие крупных каркасных структур на периферии вакуумной камеры токамака Т-10, подсвеченных вспышкой видимого света при «сгорании» углеродной микрочастицы - «пеллеты», инжектированной в разрядную камеру (см. структуру типа тележного колеса в левом верхнем углу в окне "а", а также колесо в окне "b", расположенное в торцевом поперечном сечении вертикально направленной трубчатой структуры). Исходный снимок получен В.Ю. Сергеевым.

На следующем этапе непосредственной, по возможности «лобовой» проверки гипотез - в сотрудничестве с коллегами из Курчатовского института [26,28] и МИФИ [27] - были найдены следующие подтверждения реалистичности развиваемого подхода.

4.2. Обнаружены [26] трубчатые структуры (а также структуры с характерной топологией типа тележного колеса) в нанометровом и микрометровом диапазоне в базе данных по электронной (просвечивающей и сканирующей) микроскопии различных типов пылевых депозитов (частиц и пленок, преимущественно углеродных), извлеченных из камеры токамака Т-10 (см. рис. 1-5 в [26]). Эти результаты указывают на значительную широту диапазона условий электрического разряда, при которых может происходить образование трубчатых наноструктур. Важно отметить, что микропылевые структуры типа тележного колеса (см. рис. 2,3,5 в [26]) были обнаружены впервые.

4.3. Обнаружено [26] предсказанное в [10-12] подобие трубчатых структур как внутри вышеуказанного диапазона пространственных размеров, так и подобие структурам (в сантиметровом диапазоне размеров), которые

были ранее обнаружены [13(a,c)] в плазме токамаков ТМ-2, Т-4, Т-6 и Т-10. Эти результаты позволяют протянуть своего рода «мост» между нанометровыми и микрометровыми структурами (являющимися заведомо конденсированной, «твердой» средой), доступными к наблюдению только в «спокойных» условиях электронной микроскопии, и макрообъектами, наблюдаемыми различными диагностиками В реальной, очень «неспокойной» плазме.

Прямое сопоставление структур типа тележного колеса, топология которых весьма близка и достаточно узнаваема для ее надежной идентификации, проведено на рис. 1, помещенном на 3-ей странице обложки Здесь показано подобие трубчатых структур в журнала. токамаке (макроструктур в плазме и микроструктур в пыли), различающиеся размером на пять порядков величины [26]. На рис. 1(а) видна структура типа тележного колеса в плазме токамака ТМ-2 (тороидальное направление - по горизонтали, малый радиус тороидальной камеры равен 8 см, в центре шнура электронная температура ~ 500 эВ, а электронная плотность ~ 10¹³ см⁻³). Изображение получено методом фоторазвертки с эффективной экспозицией менее 1 мкс (исходный снимок взят из данных экспериментов [29]). На рис. 1(б) показана трубчатая структура, которая обнаружена как небольшой (диаметром 70 нм) фрагмент пылевой частицы размером 1,2 мкм, извлеченной из масла турбомолекулярных насосов, используемых для откачки вакуумной камеры в токамаке Т-10. Благодаря очистке частицы от аморфной компоненты видны тонкие детали этой трубчатой структуры (например, виден стержень на оси трубы и соединительные радиальные связи).

Другой пример сопоставления каркасных трубчатых структур в электрическом разряде (конкретно - Z-пинче) и в пылевой микрочастице (извлеченной из токамака T-10) дан на Рис. 2. Здесь различие в размерах составляет примерно четыре порядка величины.

4.4. В «пылевых» данных в нанометровом и микрометровом диапазоне просматривается [26] предсказанная в [10-12] тенденция к самоподобию, т.е. составленности большей структуры из аналогичной структуры меньшего или много меньшего размера. Иллюстрацией такого явления может служить рис. 1(б). Так, составным элементом всей трубчатой структуры -- в ее левой стороне -- является трубчатая же структура меньшего размера (диаметром ~10 нм). Удалось также показать, что для каркасных структур различной топологии и пространственной размерности (нитевидных, шаровидных и других), также обнаруженных в пылевых осадках, роль ключевого строительного блока играют именно трубчатые структуры. Это согласуется с гипотезой [10-12] в том смысле, что трубчатые структуры являются, повидимому, самым эффективным блоком для строительства самоподобных структур.

4.5. Структура типа тележного колеса, являющаяся наиболее характерной и топологически узнаваемой структурой среди обнаруженных ранее на квазистационарной стадии разряда в токамаках, Z-пинче и плазменном фокусе, обнаружена также и на *начальной* стадии развития электрического разряда в различных типах установок:

(а) в вакуумной искре на «темной» фазе разряда в экспериментах 2000 г. [27,30] (рис. 6). Основные параметры разряда: емкость конденсаторной батареи 12 мкф, напряжение 10 кВ, максимальный ток ~ 150 кА, период ~ 5 мкс. На «темной» фазе разряда ток меньше 20% максимального, а собственное свечение плазмы пока еще ниже уровня его детектируемости электронным оптическим преобразователем (ЭОП), обладавшим коэффициентом усиления 10^5 . Поэтому диагностировать наличие структур в разрядной камере удалось только с помощью импульсной лазерной подсветки (импульс длительностью 6 нс, λ =337 нм).

(б) в токамаке Т-6 на стадии пробоя (примерно за 300 мкс до появления сигнала в поясе Роговского, детектирующем электрический ток всего разряда) [28,30] в базе данных давних экспериментов;

(в) в плазменном фокусе ЛВ-2 на стадии пробоя (примерно за 100 нс до появления разрядного тока) в базе данных давних экспериментов с использованием ЭОПа [30] (рис. 7).

Обнаружен [31] (с помощью электронной просвечивающей 4.6. микроскопии) феномен каркасов древовидной структуры, состоящих из нитей диаметром порядка нескольких нанометров. Такие структуры найдены как в отдельных субмикронных частицах различной формы (шаровидной, волоконной), так и в агломератах визуально отдельных пылевых частиц, извлеченных из камеры токамака Т-10 (см. рис. 2(б,в) на 3-ей странице обложки). Это показывает, что широкий класс каркасных структур - по крайней мере субмикронного размера - может быть образован в результате действия гипотетического механизма [10-12] стримеро-подобной, древовидной «сборки» каркасов из нанотрубчатых блоков. Интересно, что данные рис. 1(б) на 3-ей странице обложки указывают на то, что результатом древовидного механизма построения блоков может быть также и трубчатая структура. Действительно, в трубчатой структуре на рис. 1(б) ее внутренний центральный стержень играет роль «ствола», поскольку радиальные связи существуют не только в торцевом сечении (в структуре типа тележного колеса), но также и между стволом и боковыми трубчатыми структурами в промежуточных сечениях.

Приведенные выше результаты подразделов 4.1-4.6 находятся в качественном соответствии с гипотезой [10-12] о роли микропыли в формировании электрического пробоя в сильноточных разрядах, приводящих к образованию долгоживущих филаментарных структур.

5. Новейшие данные по физике наноструктур, актуальные для физики каркасных наноматериалов.

Приведем здесь несколько новейших данных по физике наноструктур и наноматериалов, которые демонстрируют корреляцию со свойствами трубчатых наноструктур, изначально «заложенными» (в явной или неявной форме) в гипотезах [10-12] о каркасных структурах (см. подробнее подраздел 3.2) и, соответственно, ожидаемыми нами в момент формулировки этих гипотез. В этом смысле обсуждаемые ниже свойства можно назвать необходимыми для реальности выдвинутой концепции.

Предполагаемые свойства таких каркасов как нового типа ультрадисперсных (нано-)материалов в значительной мере связаны с магнитными свойствами нанотрубок. Здесь особенно аномальными значимым оказалось сравнительно недавно открытое [32] явление аномально слабого затухания токов, возбуждаемых магнитным полем, захватываемым помещенными в него фрагментами необработанных катодных депозитов, содержащих многослойные углеродные нанотрубки. Обнаруженное в [32] явление близко к многосвязной высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), поскольку захват магнитного потока происходит в условиях диамагнетизма исследуемого образца, обладающего петлей гистерезиса, характерной для сверхпроводников второго рода. Сама же по себе возможность существования ВТСП в исследованных потенциальная образцах ассоциируется в [32] с возникновением незатухающих токов (получивших в литературе обобщенное название «persistent currents»). Такого рода токи не обязательно обусловлены конкретным типом сверхпроводимости, например куперовскими парами. Время жизни таких токов при комнатной температуре оказывается в [32] порядка суток. Незатухающие токи могли бы протекать, как полагают в [32], по мезоскопическим путям, конкретно - по наблюденным в образцах тонким трубкам (диаметром в несколько десятков нанометров, что характерно для

многослойных углеродных нанотрубок), которые образуют кольцевые структуры с диаметром в несколько десятков микрометров. Исследования необратимой намагниченности производилось и при весьма сильных магнитных полях ~ 10 Т (правда, для таких полей - только при низких температурах, ~ 4 К).

Интересно, что основные результаты [32] подтверждены в только что появившейся работе [33], где исследовались жгуты (гореs) диаметром ~ 100 мкм и длиной ~ 1 мм, состоящие из «связок» (bundles), собранных, в свою очередь, из отдельных углеродных нанотрубок (метод получения образцов - дуговой разряд). Исследования намагниченности проводились при меньших, чем в [32] полях, однако при больших температурах. Так удалось показать, что наблюдаемое в образцах явление может иметь природу ВТСП (хотя возможны и другие интерпретации). Такая версия означает, что наблюденная ВТСП может существовать при температурах выше 400 K, что на сегодняшний день является наибольшим продвижением в сторону больших температур.

Еще одним свидетельством в пользу возможности бездиссипативного электрического транспорта в многослойных углеродных нанотрубках может служить и более ранняя работа [34], где при комнатной температуре в отдельной многослойной углеродной нанотрубке (используемой как щуп сканирующего электронного микроскопа, погруженный в жидкий металл) было найдено явление баллистического (т.е. не зависящего от длины трубки) переноса электрического тока (и притом без выделения тепла) с плотностью 10⁷ А/см². В измерениях было обнаружено тока вплоть до малое, сопротивление. «квантованное» электрическое Однако даже такого сопротивления с запасом хватило бы для «сгорания» нанотрубки, если бы соответствующее тепловыделение происходило в ней самой. Поэтому скорее электросопротивление было обусловлено всего вкладом остальных элементов электрической цепи (прежде всего, контактов).

Обсуждаемое явление многосвязной ВТСП играет важную роль в разрешении основного парадокса в гипотезе [10-12], а именно возможности долгого существования конденсированной среды неожиданно внутри горячей плазмы, вплоть до килоэлектронвольтных температур (в отличии от известной «холодности» обычной пылевой плазмы). Для объяснения указанного парадокса, как уже указано в подразделе 3.3, и была выдвинута гипотеза о «естественных кабелях» [13]. Напомним, что давление зарегистрированных в [18,19,21] ВЧ полей способно оттеснить от каркаса окружающую его высокотемпературную плазму, однако для этого требуется энергии ЭМ аномально низкая диссипация волн (c локальной напряженностью полей вблизи каркаса вплоть до 10⁶ В/см) при их распространении вдоль каркаса. Последнее свойство как раз И обеспечивается тем, что структура наноматериала, из которого построен каркас, может быть такова, что в нем, как это вытекает из [32,33], небольшие аномально высокой электропроводности (т.е. почти ВТСП) vчастки вкраплены в электропрочный диэлектрик.

Другим важным аспектом магнитных свойств является захват такого магнитного потока, при котором возможно ощутимое взаимное притяжение нанотрубчатых блоков. Такой механизм существен для вышеуказанной гипотетической выстраивания возможности каркасных структур ИЗ отдельных наноблоков во внешних динамических полях и дальнейшего Захват самоподдержания таких структур. магнитного потока В экспериментах [32,33] состоянии диамагнетика, обусловленного В сверхпроводимостью второго рода в многосвязной среде, принципиально, как физический механизм вполне приемлем для строительства каркасов. Между тем, имеет смысл вести речь об эффективности процесса захвата или генерации магнитного поля и в более общем случае, независимо от образования конкретного микроскопического механизма магнитных микродиполей.

В пользу сказанного говорит только что вышедшая работа [35], сообщающая о другом механизме свойств аномальных магнитных ромбоэдрального $(Rh-C_{60}).$ наноматериала конкретно, фуллерита Оказывается, лаже чистый углерод форме указанного что В конденсированного состояния вещества может обладать ярко выраженными свойствами ферромагнетика (а именно насыщением намагниченности, большой петлей гистерезиса и остаточной намагниченностью) при неожиданно высоких температурах с точкой Кюри при ~500 К.

Тем самым результаты [32,33,35] указывают на широту условий проявления и потенциальную высокотемпературность аномальных магнитных свойств различных наноматериалов.

6. Основные задачи дальнейшей экспериментальной проверки концепции и связь этих задач с проблемами МСТ.

Дальнейшая проверка справедливости выдвигаемой концепции должна включать исследования как в рамках конкретных научных областей, значимых для проблемы в целом (см. раздел 1), так и на их стыке для объединения усилий в единую схему. Такие исследования могут включать, в частности, изучение следующих проблем [36,37]:

- аномальные свойства трубчатых структур в условиях электрического пробоя; модельные эксперименты с трубчатыми наноструктурами;
- прослеживание процесса выстраивания («сборки») каркасов в электрических разрядах (с помощью диагностик высокого разрешения --как в современных экспериментах с термоядерной плазмой и лучше); оценка возможности управления сборкой каркасов на стадии пробоя в электрических разрядах и оптимизация свойств каркасов;
- физические и химические свойства осадков каркасного типа, в развитие работ [26,31] и их распространения на исследование пылевых осадков в электрических разрядах других типов (прежде всего, представляет интерес

время жизни каркасов в условиях возможных технологических применений).

Указанные задачи важны для оценки эффективности строительства каркасных структур и получения новых конструкционных наноматериалов. Возможные технологические применения таких каркасных наноматериалов могут охватить необычайно широкий спектр материаловедческих и технологических аспектов различных проблем, прямо или косвенно связанных с микросистемной техникой. Из большого числа таких проблем можно указать, в частности, следующие направления.

- 1. Создание высокопрочных материалов с внутренней микрокаркасной структурой.
- 2. Улучшение свойств покрытий на различных поверхностях с помощью микропылевых каркасных структур.
- 3. Создание слабодиссипативных ВЧ кабелей.
- Охлаждение микроэлектронных схем с помощью микропылевых каркасных структур на основе аномальной термоэлектронной эмиссии наноблоков.
- 5. Создание термоэлектрических преобразователей на основе аномальной термоэлектронной эмиссии из наноблоков микропылевых каркасных структур.
- Создание фотовольтаической ядерной батареи на основе радиоизотопных микропылевых каркасных структур.
- 7. Создание долговременных автономных источников света на основе радиоизотопных микропылевых каркасных структур.
- 8. Получение новые катализаторов для химических и плазмохимических реакторов.

Заключение.

Приведенные выше результаты по проверке гипотез [10-12] о возможности образования микропылевых каркасов из (углеродных) нанотрубок в различных типах электрического разряда показывают жизнеспособность указанных гипотез. Соответственно, предполагаемые свойства таких каркасов означают возможность существования нового типа ультрадисперсных (нано)материалов, который уместно назвать каркасным наноматериалом, с очень широким спектром его возможного применения.

Авторы глубоко благодарны Б.Н.Колбасову & П.В.Романову, А.С.Савёлову и В.А.Крупину - за сотрудничество в работах [26-28], В.М.Леонову, С.В.Мирнову & И.Б.Семенову, К.А.Разумовой, В.Ю.Сергееву, А.Р.Терентьеву и Н.Г.Ковальскому - за предоставление оригиналов данных с токамаков Т-6, Т-4, ТМ-2, Т-10, плазменного фокуса ЛВ-2 [24] и лазерного [25], соответственно. Особая благодарность В.И.Когану факела за неизменную поддержку и интерес к настоящей работе. Нам приятно частичную также финансовую поддержку отметить co стороны Министерства PΦ по атомной энергии Российского фонда И фундаментальных исследований (грант РФФИ 00-02-16453).

Список литературы

- Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. Dense Z-Pinch Plasma as a Dynamical Percolating Network // Laser and Particle Beams. 1998. V. 16. P. 445-471.
- Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. Self-similarity of plasma networking in a broad range of length scales: from laboratory to cosmic plasmas // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70. P. 1387-1391.
- Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. Observations of a dynamical percolating network in dense Z-pinch plasmas // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70, P. 1421-1426.
- Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. Plasma networking in magnetically confined plasmas and diagnostics of non-local heat transport in tokamak filamentary plasmas // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70. P. 1392-1396.
- Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A., Terentiev A.R. Self-Organization Phenomena in Dense Plasma Focus Experiments // Strongly Coupled Coulomb Systems / G.J. Kalman, K.B. Blagoev, J.M. Rommel (eds.). New York: Plenum Press. 1998. P. 129-133.
- Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A., Terentiev A.R. Formation of a Spheromak-Like Magnetic Configuration by a Plasma Focus Self-Transformed Magnetic Field // Fusion Technology. 1997. V. 32. P. 83-93.
- 7. Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A., Terentiev A.R. Large-Scale Spheromak-Like Magnetic Configuration (SLMC) in High-Current Discharges: Self-Formation and Self-Compression of the SLMC in Plasma Focus Experiments // AIP Conference Proceedings /Dense Z-pinches 4th Int. Conf., Vancouver, Canada, May 1997. N. Pereira, J. Davis, and P. Pulsifer (eds.). New York: AIP Press. 1997. #409. P. 377-380.
- Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A., Terentiev A.R, Cherepanov K.V. Short-Scale Mixing of the Plasma and Magnetic Field, and Magnetic Flux Ropes in Plasma Focus Experiments // Ibid. P. 381-384.

- Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A., Terentiev A.R. Energy concentration in a high-current gas discharge: experiments on plasma-focusproduced dense-plasma spheromak // Transactions of Fusion Technology. 1995. V. 27. P. 325-328.
- 10.Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A., Filamentation and networking of electric currents in dense Z-pinch plasmas // Fusion Energy 1998 / Proc. 17th IAEA Fusion Energy Conference. Yokohama, Japan, 19-24 October 1998/ Vienna: IAEA. 1999. IAEA-CSP-1/P. V. 3. P. 1131-1134 (http://www.iaea.org/programmes/ripc/physics/pdf/ifp_17.pdf).
- 11.Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. Long-living filamentation and networking of electric current in laboratory and cosmic plasmas: from microscopic mechanism to self-similarity of structuring // Current Trends in Int. Fusion Research: Review and Assessment / Proc. 3rd Symposium, Washington D.C., 1999/ Panarella (eds.). Ottawa: NRC Research Press. 2001 P. 107-135.
- 12.Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. Microsolid tubular skeleton of long-living filaments of electric current in laboratory and space plasmas // Proc.
 26-th Eur. Phys. Soc. conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion / Maastricht. Netherlands. 1999 P. 873-876 (http://epsppd.epfl.ch/Maas/web/pdf/p2087.pdf).
- 13.Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. (a) Wild Cables in Fusion Plasmas (Experiment) // Proc. Innovative Confinement Concepts Workshop (ICC-2000). Berkeley. California USA: 2000. http://icc2000.lbl.gov/proceed.html...; (b) Wild Cables in Fusion Plasmas (Theoretical View) // Ibid.. (c) Wild Cables in Tokamak Plasmas (Experiment) // Proc. 27-th Eur. Phys. Soc. conf. on Plasma and Contr. Fusion. Budapest. Hungary: 2000. Phys. http://sgi30.rmki.kfki.hu/EPS2000/P2 029.pdf; (d) Wild Cables in Tokamak Plasmas (Theoretical View) // Ibid. http://...P2 028.pdf; (e) Wild Cables in Zpinch and Plasma Focus // Ibid. http://...P2 051.pdf; (f) Естественные кабели в плазме токамака // Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный

синтез. 2000. вып. 2. С. 69-85; (g) // Rev. Sci. Instrum. 2001 V. 72. (#1, Part II). Р. 506-507.

- 14.Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. On the probable principles of electric current networking in magnetically confined toroidal plasmas. Preprint of the RRC "Kurchatov Institute". Moscow. May 1998. IAE 6095/6. 52 P.
- 15.Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. An extension of Relaxed State Principle to tokamak plasmas with ITBs // Proc. 26-th Eur. Phys. Soc. conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion. Maastricht, Netherlands. June 1999. P. 1737-1740 (http://epsppd.epfl.ch/Maas/web/pdf/ p4096.pdf).
- 16.Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. Similarity of skeletal structures in high-current electric discharges and laser-produced plasmas: observations and hypotheses // Advances in Laser Research. Nova Science. 2002 (to be published); // Bull. Am. Phys. Soc.. / Abstracts 43rd Annual meeting of APS Division of Plasma Physics. Lawrence Berkeley Lab: Long Beach, CA, USA. 2001. RO2.010 (http://www.aps.org/meet/DPP00/baps/....).
- 17. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки // УФН. 1997. Т. 167. С. 945-972.
- 18.Гавриленко В.П., Окс Е.А., Ранцев-Картинов В.А. Обнаружение и анализ осциллирующих электрических полей в периферийной плазме токамака на основе нового спектроскопического эффекта // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 44. №7. С. 315-317.
- 19. Ранцев-Картинов В.А. Наблюдение электрических полей в плазме токамака // Физика плазмы. 1987. Т. 13. С. 387-391.
- 20.Poznyak V.I. et. al. // Proc. 1998 ICPP and 25-th Eur. Phys. Soc. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion. Prague: ECA. 1998. Vol. 22C. P. 607-610.
- 21.Окс Е.А., Ранцев-Картинов В.А. Спектроскопическое обнаружение и анализ плазменной турбулентности в Z-пинче // ЖЭТФ. 1980. Т. 79. №1(7). С. 99-115.
- 22.Kukushkin A.B. // Письма ЖЭТФ. 1992. V. 56. P. 487-491; // Proc. 14th IAEA Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion. Wuerzburg, Germany. 1992.

V. 2. P. 35-45; // Proc. 24th Europ. Phys. Soc. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion. Berchtesgaden, Germany. 1997. Contr. Papers. Vol. 21A. Part II. P. 849-852.

- 23.Callen J.D., Kissick M.W. Evidence and concepts for non-local transport // Plasma Phys. and Contr. Fusion. 1997. V. 39. Suppl. 12B. P. 173-188.
- 24. **Орлов , Терентьев А.Р., Храбров В.А.** // Физика плазмы. 1985. Т. 11. С. 1268; // Там же. С. 1517.
- 25. А.Е. Бугров и др. // ЖЭТФ. 1997. Т. 111. С. 903.
- 26.Kolbasov, A.B. Kukushkin, V.A. Rantsev-Kartinov, Romanov P.V. Similarity of Micro- and Macrotubules in Tokamak Dust and Plasma // Phys. Lett. A. 2000. V. 269. P. 363-367.
- 27.Кукушкин А.Б., Ранцев-Картинов В.А., Прохорович Д.Е., Сивко П.А., Савёлов А.С. Диагностика начальной стадии разряда в вакуумной искре // Материалы II Российского Семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля вещества и окружающей среды». Москва: МИФИ. 20-22 июня 2000. С. 53-55; Наблюдение каркасных структур на начальной стадии разряда в вакуумной искре // Аннотации 28^{ой} Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (19-23 февраля 2001). С. 163 (http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXVIII/PP/ru/u1/03-Rantsev.doc; .../PP/en/03e-Rantsev.doc).
- 28.Крупин В.А., Ранцев-Картинов В.А., Кукушкин А.Б. Трубчатые и колесообразные структуры в плазме токамака Т-6 // Аннотации 28^{ой} Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (19-23 февраля 2001). С. 49. (http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXVIII/MU/ru/s1/11-Rantsev.doc; .../MU/en/11e-Rantsev.doc)
- 29. Vinogradova N.D., Razumova K.A. // Int. Conf. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res. (Culham, U.K., 1965). Vienna: IAEA. 1966. V. 2. P. 617.
- 30.Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A. Long-lived filaments in fusion plasmas: review of observations and status of hypothesis of microdust-

assembled skeletons // Current Trends in Int. Fusion Research - Proc. 4-th Symposium (Washington DC, USA, March 2001) / C.D. Orth, E. Panarella and R.F. Post (eds.). Ottawa, Canada: NRC Research Press. 2002 (to appear).

- 31.Kolbasov B.N., Kukushkin A.B., Rantsev-Kartinov V.A., Romanov P.V. Skeletal dendritic structure of dust microparticles and of their agglomerates in tokamak T-10 // Phys. Lett. A. 2001. V. 291. P. 447-452.
- 32.Цебро В.И., Омельяновский О.Е. Незатухающие токи и захват магнитного потока в многосвязной углеродной нанотрубочной структуре // УФН. 2000. Т. 170. С. 906-912.
- 33.**Zhao G., Wang Y.S.** Possible superconductivity above 400 K in carbon-based multiwall nanotubes. Preprint. http://www.arxiv.org/abs/cond-mat/0111268 (to be published in Phil. Mag. B).
- 34.Frank S., et. al. Carbon nanotube quantum resistor // Science. 1998. V. 280. P. 1744-1746.
- 35.**Makarova T.L., et. al.** Magnetic carbon // Nature (London). 2001, V. 413. P. 716-718.
- 36.Кукушкин А.Б., Ранцев-Картинов В.А. Долгоживущие микропылевые каркасы в электрических разрядах как новый тип наноматериалов // Сборник трудов научной сессии МИФИ-2001. Москва: МИФИ. январь 2001. Т. 9. С. 146-147.
- 37.Кукушкин А.Б., Ранцев-Картинов В.А. Микропылевые каркасы как новый тип наноматериалов: І. Наблюдения и проверка гипотез. II. Гипотезы // Материалы 6-го Всероссийского совещания-семинара "Инженерно-физические проблемы новой техники". Москва: МГТУ им. Баумана. Май 2001. С. 11-14.

К статье А.Б. Кукушкина и В.А. Ранцева-Картинова «Микропылевые каркасные структуры в электрических разрядах как новый тип наноматериала»



Рис. 1. Подобие трубчатых структур в токамаке (макроструктур в плазме и микроструктур пыли), в различающиеся размером на пять порядков величины [26]. **(a)** Структура типа тележного колеса в плазме токамака ТМ-2. Диаметры большего меньшего И кольцеобразных структур на общей «тележной» оси равны ~2,2 см и ~1 соответственно. Позитив, CM. экспозиция 1 мкс (исходный снимок взят из базы данных [29]). (б) Трубчатая структура (диаметром 70 нм и длиной 140 нм) в левой части фотографии является малым фрагментом пылевой частицы,

извлеченной из масла турбомолекулярных насосов, используемых для откачки вакуумной камеры в токамаке T-10 (высота изображения 270 нм, увеличение просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) 34000). Видны «тележное колесо» в ближнем торцевом сечении трубы, внутренний центральный стержень, соединительные радиальные связи.





Рис. 2. Каркасы из трубчатых структур в электрическом разряде типа Z-пинч и в пылевой микрочастице в токамаке T-10, различающиеся размером на четыре порядка величины. (а) Фотография «перетяжки» на вертикальном плазменном столбе Z-пинча. Негатив, экспозиция 2 нс. Каркасная структура оказалась оголенной, когда магнитное поле вытеснило ярко светящуюся, плотную плазму из «перетяжки». Указаны трубки: вертикальная «в» (диаметром d ~ 0,4 мм), горизонтальная «г», коаксиальная «к» (d ~ 1 мм) и наклонная «н». (б) Агломерат визуально отдельных пылевых частиц [31] (увеличение ПЭМ 26000, пирина изображения ~ 590 нм) на стеклянном фильтре (см. темную полосу слева внизу) в осадке, полученном при откачке пыли из гофра вакуумной камеры токамака T-10.



(в) Увеличенное изображение окна на рис. (б). Визуально отдельная квази-сферическая частица оказывается проекцией края трубчатого (диаметром ~ 30 нм) каркаса, облепленного аморфным веществом. Ширина изображения ~ 120 нм. Схема слева вверху получена на основе метода МДК [1,2] с мозаичной картой контрастирования [31].



Рис. 3. Фотография (позитив) слоя (шириной 7,5 см и толщиной 5 см) на оси газового Z-пинча в области «перетяжки», образующейся на вертикально направленном плазменном столбе. Экспозиция 10 нс, момент времени t = +50 нс. Древовидные трубчатые филаменты в центральной секции имеют диаметры d = 0.7 - 1.5 мм, а толстые фрактальные образования («темные» филаменты), образующие «перетяжку» на ярком вертикальном плазменном столбе (т.е. на белом фоне) и хорошо различимые в левой и правой секциях изображения, имеют ширины ~ 1.2 и 0.5 см, соответственно.



Рис. 4. Тонкая структура типичного радиально направленного филамента в Z-пинче (см. Рис. 3). Здесь (вертикальная) ось пинча расположена на левом краю изображения, время t =+300 нс, ширина изображения 3,5 см, позитив. Диаметр кольца на левом конце темного филамента фрактального составляет ~3 мм, а тончайшие различимые филаменты в диаметре всего несколько сотен микрометров.



Рис. 5. Изображение периферии токамака Т-10, подсвеченной вспышкой видимого света при «сгорании» углеродной микрочастицы - «пеллеты», инжектированной в разрядную камеру токамака (след от траектории «пеллеты» находится достаточно далеко справа от границы изображения). Негатив, тороидальное направление токамака - по горизонтали. Высота изображения 8,5 см (малый радиус тороидальной камеры токамака T-10 равен 33 см). Диаметр длинного толстого филамента ~ 3-4 мм. Уровень контрастирования изображения в окнах "а" и "b" отличается от такового в остальной части для того, чтобы показать тонкую структуру «колес» и преемственность структурирования в целом.



Рис. 6. Трубчатые структуры и «тележные колеса» в вакуумной искре (плоский катод, с центральным отверстием d= 3 мм, находится внизу на расстоянии 2 мм от закругленного конца стержневого анода). Изображение получено на «темной» фазе разряда с помощью импульсной лазерной подсветки. Изображения в окнах 'a' и 'b' обработаны с бо'льшим уровнем контрастности. Тележное колесо видно и в окне 'b', и в левой нижней части снимка в виде эллиптической структуры большего размера.



Рис. 7. Трубчатые структуры и «тележные колеса», обнаруженные в плазменном фокусе ЛВ-2 [24] еще за ~100 нс до появления разрядного тока (т.е. его детектирования поясом Роговского). Изображение получено с помощью ЭОПа, позитив, экспозиция 2 нс, ширина снимка 4,6 см. Структуры видны на фоне круглого вертикально расположенного фарфорового изолятора, чей левый край виден в левой части снимка как белая вертикальная полоса (верх грибообразного анода расположен чуть выше верхнего края снимка, а нижняя часть камеры-катода находится вблизи нижнего края снимка).

MICRODUST SKELETAL STRUCTURES IN ELECTRIC DISCHARGES AS A NEW TYPE OF NANOMATERIAL

A.B. Kukushkin, V.A. Rantsev-Kartinov

Institute for Nuclear Fusion of Russian Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russia

ABSTRACT

A brief survey is given for a wide scope of experimental data which enabled the authors to find the phenomenon of long-lived filamentary structures in plasmas of electric discharges of various type (tokamaks, Z-pinch, plasma focus, laserproduced plasma, vacuum spark), as well as of the results of experiments (nanostructural analysis of dust deposits and diagnostics of initial stage of electric discharge) on the verification of suggested hypothesis for the microdusty origin of such filaments. A brief survey is given for major hypotheses about the assembling of microdust skeletons from (carbon) nanotubes in electric discharge of various type and the expected properties of such skeletons which are worth to call a skeletal nanomaterial. The correlation is shown between the expected properties of such nanomaterial and the newest findings in the physics of nanostructures.