

УДК 533.9

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ ТОНКИХ ПРОВОДНИКОВ (СМЕНА ПАРАДИГМЫ)

© 2024 г. В. М. Романова<sup>а</sup>, \*, И. Н. Тиликин<sup>а</sup>, А. Е. Тер-Оганесьян<sup>а</sup>,  
А. Р. Мингалеев<sup>а</sup>, Т. А. Шелковенко<sup>а</sup>, С. А. Пикуз<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

\*e-mail: vmr@inbox.ru

Поступила в редакцию 25.04.2024 г.

После доработки 02.07.2024 г.

Принята к публикации 15.07.2024 г.

За многие десятилетия изучения электрического взрыва тонких проволочек (ЭВП) в сознании исследователей сложились и прочно закрепились определенные представления об этом процессе. Несмотря на недоказанность некоторых устоявшихся утверждений и даже при их противоречии результатам современных экспериментов, они по-прежнему широко используются для описания и интерпретации новых данных. Прежде всего, это относится к представлению об ЭВП как о быстром испарении металла в результате диссипации в нем джоулевой энергии. Другим принципиальным предположением, используемым при анализе экспериментальных результатов и проведении модельных расчетов, является однородность распределения вещества по сечению проволочного остова в процессе взрыва. До сих пор остается невыясненной природа и механизм образования страт — наблюдаемой во многих экспериментах периодичности на изображениях ЭВП. Использование традиционных представлений об ЭВП, даже при высоком уровне ряда конкретных исследований, не позволяет правильно интерпретировать полученные результаты и в целом не способствует прогрессу в понимании сложной физики взрыва проволочки. Поэтому традиционные концепции ЭВП давно требуют пересмотра. В настоящей работе суммированы результаты современных исследований в данной области и рассмотрено их отношение к предыдущим работам. Предложены новые подходы к исследованиям динамики ЭВП и пониманию процессов преобразования энергии в веществе при его быстром нагреве электрическим током.

*Ключевые слова:* электрический взрыв проводников, структура керн–корона, конденсированное вещество, фазовые переходы, рентгенография, лазерное зондирование

DOI: 10.31857/S0367292124090048, EDN: DVJHVV

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Мощный разряд тока через тонкий проводник способен приводить к экстремальной концентрации энергии в малом объеме вещества и его взрывному разрушению. Электрический взрыв проволочки сопровождается широким спектром явлений, относящихся к самым разным областям науки — физика твердого тела, гидродинамика, равновесная и неравновесная термодинамика, электромагнетизм, физика газового разряда, физика идеальной и неидеальной плазмы, электрофизика, оптическое и рентгеновское излучение. Сложность процессов при ЭВП является причи-

ной того, что современное знание об этом предмете все еще неполное. За десятилетия исследований накоплен большой объем экспериментальных фактов, однако адекватная теория ЭВП так и не построена, а наиболее очевидные достижения относятся по преимуществу к различного рода прикладным областям. Как отмечалось еще в 1968 г., “одна из нынешних трудностей, связанных с этим предметом, проистекает из того факта, что как теоретики, так и экспериментаторы могут работать над столь разными проблемами, что общая точка зрения и полезные обобщения оказываются трудно достижимыми” [1], и в этом смысле с тех пор не так уж много изменилось. Более того,

приходится с сожалением констатировать некоторую даже деградацию общего осмысления – при многократно возросшем уровне технических возможностей эксперимента и мощности компьютерных расчетов. Исследования, как правило, направлены на решение локальных задач. При этом в новейших работах по ЭВП часто игнорируются факты, описанные еще в середине прошлого века. Например, трубчатая структура зерна была сфотографирована и описана еще в 1959 г. [2]. Возможно, новым исследователям эти факты просто неизвестны. Но даже когда они переоткрываются заново [3], подход к материалу редко меняется: раз какие-то данные не вписываются в “действующую парадигму”, их проще игнорировать. Словом, настоятельно требуется переосмыслить достижения, проблемы и новые вызовы в области ЭВП и шире – физики экстремальных состояний вещества. Данная статья является попыткой обобщить экспериментальную картину ЭВП на современном этапе, опираясь на материалы, полученные, в основном, экспериментальной группой отдела физики высоких плотностей энергии ФИАН. Авторы многие годы занимаются исследованиями взрыва проволок и фольг на установках принципиально разного класса, с широким охватом выходных параметров и сред, в которых получены новые экспериментальные результаты, которые не укладываются в рамки имеющихся концепций. Одновременное использование нескольких диагностик позволило получить новое видение процессов ЭВП и определить на его основе направления будущих исследований. Все иллюстрации, приведенные в тексте, представляют результаты, полученные авторами.

## 2. УТОЧНЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ЭВП

Исторически и до настоящего времени все электровзрывы принято разделять на три группы (категории) – в зависимости, в конечном итоге, от скорости вложения энергии в нагрузку  $W$ : медленные, быстрые и сверхбыстрые (последние называют также взрывной абляцией) [1, 4–6]. Физика основных процессов в каждой из категорий существенно разная, и протекают они с разными характерными временами. Классические медленные взрывы (этот вид ЭВП был изучен самым первым) приводят к распаду проволоки на макроскопические фрагменты (капли) размером масштаба сотен микронов. За время нагрева – порядка нескольких миллисекунд – в ней успе-

вают развиваться МГД-неустойчивости с модами 0 и 1, приводящие к возникновению так называемых “ондулоидов”, “сегментов”, а также к изгибам – и, в конечном счете, к разрушению проводника. *Быстрые взрывы* (микро- и наносекунды) протекают адиабатически с энергией, достаточной для испарения проволоки или близкой к этому. Скорость вложения энергии достаточно велика, чтобы до разрушения в проводнике не успело развиваться никаких макроскопических неустойчивостей, и процесс расширения сохраняет цилиндрическую симметрию, без изгибов и пережатий. В *сверхбыстрых взрывах* омический нагрев ограничен скин-слоем; внешние слои проводника испаряются по мере диффузии тока в более холодную внутреннюю область. Для того чтобы обеспечить доминирование скин-эффекта, требуются очень быстрые устройства, и этот тип “взрыва” до сих пор остается по большей части виртуальным – его исследуют в основном теоретически или с помощью компьютерного моделирования.

В настоящее время понятие “взрыв проволоки” – при сколько-нибудь значимой величине энерговыклада – означает уже не просто нагрев нагрузки с ее последующим разрушением. Как было экспериментально установлено в 50-е гг. XX в. [7, 8], при плотностях тока, превышающих  $5 \times 10^6$  А/см<sup>2</sup>, в определенный момент происходит резкая (взрывная) потеря веществом металлической проводимости. Природа скачка удельного сопротивления под действием мощного импульса тока до сих пор остается предметом дискуссий, но очевидно, что именно с этим феноменом связано начало резкого расширения проводника, световая вспышка, ударная волна и прочие атрибуты “взрыва”. Отталкиваясь именно от такой его трактовки, традиционную классификацию ЭВП следует несколько модернизировать. 1-ю группу – макроскопическое разрушение проводника в “режиме плавкого предохранителя” [9], или, по-другому, псевдовзрывы, можно вообще исключить из рассмотрения. Сверхбыстрые взрывы также не совсем “взрывы”, поскольку в этом случае проводимость внутреннего зерна сохраняется все то время, пока оболочка испаряется слой за слоем. Наибольший интерес представляет широкий класс “настоящих взрывов” ( $0.1$  кДж/г·нс  $< W < 100$  кДж/г·нс) – как из-за необычного богатства физики фазовых переходов, сопровождающих взрывную трансформацию вещества, так и по причине многочис-

ленных практических применений этой категории ЭВП. В соответствии с характерным временем вложения энергии такие взрывы естественно подразделять на микросекундные (медленные) и наносекундные (быстрые). Опыт показывает, что физика взрыва (возникающие в процессе взрыва явления) в обоих случаях практически одна и та же — при том что шкала времени отличается на несколько порядков.

Имеет смысл также особо выделить такую важную группу быстрых взрывов, как сильноточные, производимые с использованием генераторов на формирующих линиях, с токами через нагрузку порядка и более 100 кА. Во времена Чейса и Беннета, авторов первых классификаций ЭВП, сильноточные установки только начали появляться, а главное, они не использовались для взрыва проводников и поэтому не могли быть тогда рассмотрены. Впоследствии техника сильноточных ЭВП получила мощное развитие, а сами они приобрели важное прикладное значение. Однако в силу традиции подобный тип взрыва не принято выделять в отдельную категорию классификации, при том что вся феноменология здесь существенно другая: стадия собственно взрыва проходит настолько быстро, что ее трудно изучать, зато доминируют поствзрывные, в основном плазменные эффекты — МГД-сжатие плазменного шнура (пинчевание), генерация УФ- и рентгеновского излучения, а также генерация электронных пучков.

Предлагаемые поправки позволяют более четко разделять группы явлений, характерные для различных категорий взрывов, имеющих общую природу. Например, превращение проволоочки в плазменный шнур возможно лишь в сильноточных взрывах, и поэтому совершенно бессмысленно рассматривать подобный сценарий при обычных параметрах “конденсаторного” разряда.

### 3. БАЗОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ ВЗРЫВА ТОНКОЙ ПРОВОЛОЧКИ

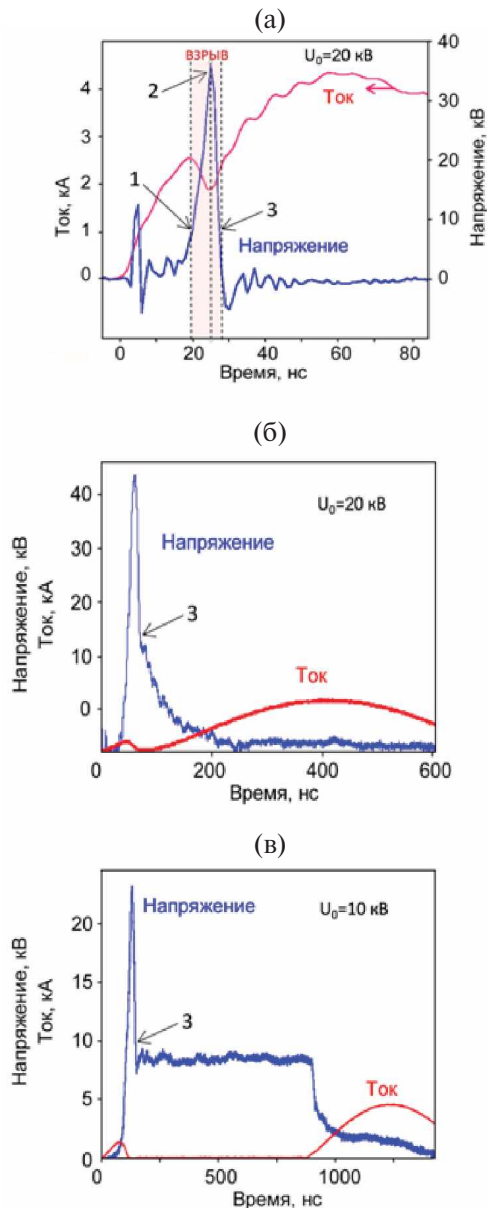
Исторически были выдвинуты и закрепились две разные концепции ЭВП. Так называемая “лебедевская концепция” [10, 11] исходит из гипотезы Френкеля, что в нагреваемом жидком металле, имеющем возможность расширяться, образуются микропустоты, или поверхности разрыва металлических связей. Происходит это, как логично предположить, прежде всего на границах доменных зерен металла, где энерговыделение более высокое. Далее процесс дробления разрастается,

и в конечном итоге металл рассыпается на облако непроводящих частиц (золь) размером порядка длины пробега электронов в металле (10 нм). Концепция в целом логичная и никем не опровергнутая, однако так и не получившая никакого теоретического развития.

Гораздо более популярной стала другая гипотеза, согласно которой причиной резкого роста сопротивления проволоочки является полное испарение металла [12]. Позднее на этой основе Беннет разработал свою модель нестационарной цилиндрической волны испарения [13, 14]. Фронт разгрузки (испарения) движется с поверхности к оси проводника с локальной скоростью звука, зависящей от свойств металла; при достижении оси проволоочка полностью превращается в непроводящий пар. Недостатки (или, скорее, неполнота) своей модели сам ее автор отчетливо осознавал и оговорил при публикации — ему уже были известны эксперименты по наблюдению страт и рассеянию света в металлическом паре. Однако последующим поколениям физиков подобная рефлексия оказалась совершенно не свойственна: в подавляющем большинстве статей по ЭВП схема процесса воспроизводится в простейшем, буквально “школьном” варианте: плавление—испарение—ионизация.

Важным дополнением к “беннетовской” модели стали данные о раннем шунтировании проволоочки [15]. Пробой вдоль поверхности приводит к прерыванию энерговыклада, поскольку ток тут же уходит из плохо проводящего вещества в окружающий его цилиндрический плазменный канал; напряжение резко падает, знаменуя так называемый коллапс напряжения (рис. 1).

Обнаружение и описание в конце 1990-х гг. стабильной структуры (непроводящий) керн—(плазменная) корона [16–18] завершило формирование общепринятой парадигмы ЭВП. Центральное положение которой можно сформулировать следующим образом: состояние вещества продуктов взрыва полностью определяется тем, на какой из стадий перехода “твердый металл—жидкость—пар—плазма” прекратился омический нагрев, т. е., в конечном счете, величиной энерговыклада к моменту пробоя. Если он превышает энергию испарения (или, тем более, энергию атомизации), проволоочка просто “обязана” полностью испариться. Трансформацию вещества, происходящую в ходе ЭВП, подобное утверждение описывает чересчур грубо и неполно — даже в ка-



**Рис. 1.** а) Характерные осциллограммы тока и напряжения при электровзрыве в вакууме. Проволочка из золота (Au), диаметр 25 мкм. 1 – начало собственно взрыва: спад тока и резкое возрастание сопротивления, 2 – максимум перенапряжения, 3 – коллапс напряжения, конец энерговыклада и резистивной стадии взрыва. Далее разрядный ток переносится плазменной короной, и контур работает в режиме закоротки; б) ток и напряжение при ЭВП в воздухе в режиме с пробоем. Материал проволочки медь (Cu), диаметр 25 мкм; в) ток и напряжение при ЭВП в воздухе в режиме с паузой тока. Материал проволочки медь (Cu), диаметр 25 мкм. Прерывание (пауза) тока возникает при низком зарядном напряжении, если в момент коллапса запасенной в конденсаторе энергии (напряжения) не хватает для пробоя разрядного промежутка. По мере расширения продуктов взрыва их плотность снижается, происходит вторичный пробой и ток в цепи возобновляется.

честве рабочей схемы. С самого начала было известно, что помимо испарения и ионизации в ходе ЭВП могут происходить также другие процессы и возникает вещество в конденсированном состоянии. Так, в давней работе Чейса описывается формирование дисперсной коллоидной структуры при взрыве медной проволочки [19]. Автор полагал, что именно это служит причиной резкого роста сопротивления у жидкого металла.

В растянутой расширяющейся жидкости при превышении предела прочности может также развиться процесс кавитации, в результате чего вещество становится двухфазной термодинамической системой, в которой сосуществуют жидкость и пар [13].

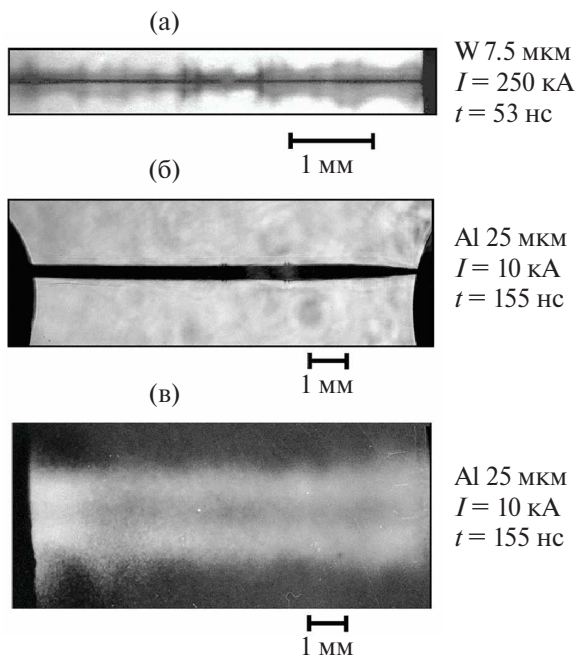
Если жидкий металл сильно перегреть – вплоть до достижения линии спинодали на фазовой диаграмме, вещество попадает в область лабильных состояний, существование метастабильной жидкости становится невозможным, и она распадается на капли и пар. Подобный сценарий был назван фазовым взрывом [20]. Позднее он был существенно доработан, – в модернизированной теории фазового взрыва процесс нуклеации метастабильной жидкости индуцируется сдвигом фазового равновесия в возрастающем магнитном поле тока [21–23]. Это позволяет объяснить одномоментное взрывное образование непроводящей смеси капель в паре, т. е. собственно взрыв проводника, в том числе при энерговыкладах, недостаточных для нагрева вещества до критической температуры. Тогда как в большинстве других моделей электровзрыв при умеренных значениях вложенной энергии не находит убедительного объяснения.

Представления о каплях в паре и пенном керне, а также термины *фазовый взрыв* и *кавитация* получили “прописку” в литературе по ЭВП, однако основная концепция (взрыв в результате испарения) остается приоритетной. К упоминаниям о конденсированной фазе в основном прибегают только если энерговыклад был настолько низким, что говорить о “полном испарении” не приходится.

#### 4. КЕРН И ЕГО ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ

Итак, центральный вопрос быстрых ЭВП – каково фазовое состояние проволочки, или, точнее, проволочного керна, образовавшегося в процессе взрыва. Прежде всего следует уточнить само понятие “кern” – что он собой представляет?

Первоначально англоязычный термин “core” означал нечто вроде “остов проволоочки, постепенно исчезающий в процессе испарения”, что очевидно не предполагало его стабильности и какой-либо особой роли в сценарии взрыва. Современное понятие о керне как о долгоживущем образовании с определенной, хорошо различимой границей, а также как о субъекте устойчивой оп-позиции керн–корона появилось в результате радиографических исследований сильноточных взрывов проволоочек [18] и проволоочных сборок [24]. Вопреки ожиданиям, оказалось, что вещество проволоочки полностью не испаряется и не становится плазмой в течение долгого времени. Даже после того как большая часть первоначальной массы нагрузки переходит в плазменную корону, оставшийся керн, лишь кратно расширенный, все еще сохраняет свои первоначальные форму и положение (рис. 2а). Точно такая же структура – непрозрачный керн, окруженный плазменной оболочкой, возникает и при взрывах проволоочек на маленьких генераторах. В этом случае плотность короны намного ниже, поэтому зарегистрировать ее удастся в основном в УФ-диапазоне (рис. 2б).



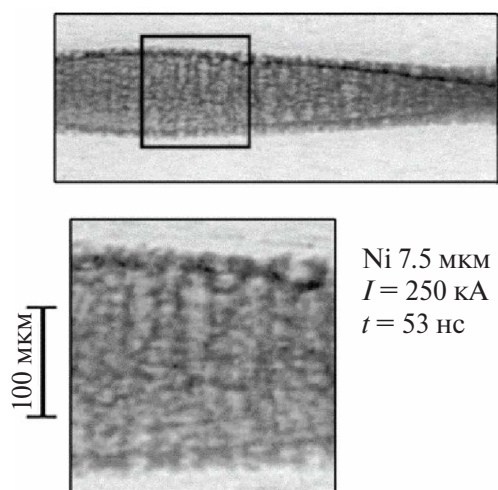
**Рис. 2.** Структура керн–корона при ЭВП в вакууме. а) Рентгеновское ( $2.5 < \lambda < 5 \text{ \AA}$ ) теневое изображение взрыва вольфрамовой проволоочки; б) лазерное ( $\lambda = 5324 \text{ \AA}$ ) теневое изображение керна при взрыве алюминиевой проволоочки; в) плазменная корона на УФ-изображении ( $\epsilon > 10 \text{ эВ}$ ), полученном в одном выстреле с (б).

Аналогичные результаты получены во множестве экспериментов по наносекундным взрывам одиночных проволоочек и многопроволочных сборок в вакууме в широком диапазоне токов и размеров проводников [25–31]. В настоящее время существование долгоживущих кернов в окружении корональной плазмы меньшей плотности можно считать надежно установленным экспериментальным результатом.

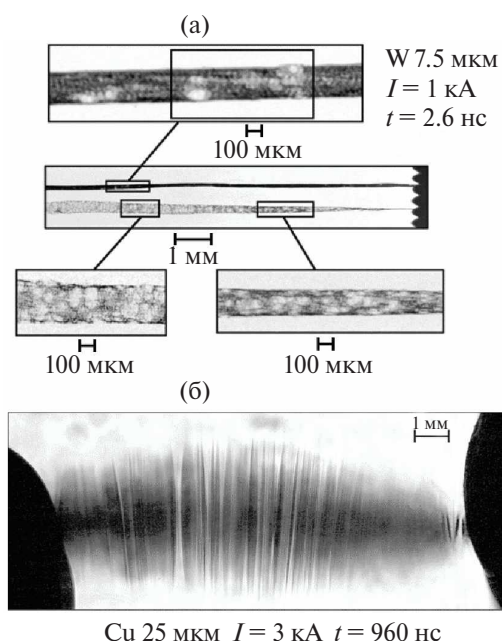
Концепция “керн–корона” естественным образом распространяется и на ЭВП в воздухе, а также других плотных средах. Здесь в качестве “плазменной короны” выступает токовый слой шунтирующего разряда, окружающий керн. Малоплотным, в смысле вакуумной короны, он, конечно, не является, поскольку весь разрядный ток (обычно спирально закрученный) в этом случае сосредоточен в узкой области вокруг керна, ограниченной снаружи фронтом цилиндрической ударной волны, которая распространяется в среде от поверхности проволоочки наружу со скоростью порядка единиц мкм/нс. Наиболее существенное отличие от ЭВП в вакууме состоит также в том, что внешняя граница керна здесь не столь четкая и может образовывать нечто вроде “шубы” или “бахромы” [32].

Понятие о структуре “керн–корона”, как правило, дополняется представлением о керне, состоящем из плотного металлического газа – испаренного вещества проволоочки. Оно восходит к беннетовской концепции взрыва и представляет собой ни на чем не основанное допущение, которое надо доказывать. То, что корональная плазма, распространившаяся по большому объему, является относительно малоплотной (ее плотность не превышает  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), не вызывает сомнений, тогда как про состояние и плотность вещества керна сложно утверждать что-либо столь же определенное. На фоне окружающей, практически прозрачной короны его, действительно, интуитивно хочется назвать “плотным”, что отражается также в привычном термине “dense core”, однако рентгенографические изображения, на которых керн часто выглядит пенообразным, далеко не всегда это подтверждают (рис. 3а).

Вообще, в зависимости от материала нагрузки строение керна может выглядеть существенно по-разному. В низкоточных ЭВП у металлов вольфрамовой группы (тугоплавкие и резистивные материалы), как правило, образуются “дырявые” керны (рис. 4а), тогда как у металлов медной



**Рис. 3.** Рентгеновское ( $2.5 < \lambda < 5 \text{ \AA}$ ) теньевое изображение взрыва никелевой проволоки на сильноточном генераторе в вакууме.



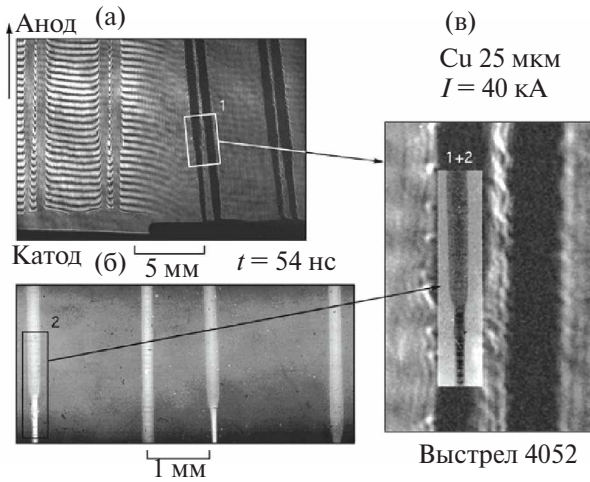
**Рис. 4.** Структуры ядер при низкоточных ЭВП в вакууме на поздней стадии разряда. а) Рентгеновское ( $2.5 < \lambda < 5 \text{ \AA}$ ) теньевое изображение взрыва вольфрамовой проволоки и б) лазерное ( $\lambda = 5324 \text{ \AA}$ ) теньевое изображение взрыва медной проволоки.

группы (легкоплавкие и хорошо проводящие) они очень часто стратифицированы – в том числе при энерговыкладах, достаточных для полного испарения вещества (рис. 4б). Характерная форма страт с заострениями на концах и резкими очертаниями границ показывает, что их природа, очевидно, не паровая. Тем более что это довольно стабильные образования, и отдельные страты, незначительно расширяясь в диаметре, способны очень долго

(по масштабам времени полного разряда) “висеть” в уже опустошенном разрядном промежутке, не теряя при этом резкости своих границ.

Важно осознавать, что кажущаяся однородность структуры ядра на рентгеновских (а тем более на лазерных) изображениях сама по себе еще не является доказательством его нахождения в состоянии пара. Это было продемонстрировано, например, в работе [33] в эксперименте по взрыву двух параллельных золотых проволок. Парообразные ядра на радиографическом изображении проходят друг сквозь друга без взаимодействия, что свидетельствует о наличии в продуктах взрыва большой доли капель,двигающихся по баллистическим траекториям (если бы столкнулись паровые оболочки, в месте их встречи образовалась бы резкая граница). Тем не менее интуитивное представление о “газовом” ядре, составленное на основе якобы очевидных опытных данных, очень популярно среди экспериментаторов. Оно годами формировалось в том числе огромным количеством теньевых изображений взрыва проволоки (чаще всего относящихся к ЭВП в воздухе), которые многими экспериментаторами обычно трактуются именно в таком духе. В качестве “доказательства” при этом выступает большая величина измеренного энерговыклада, но не анализ самих изображений.

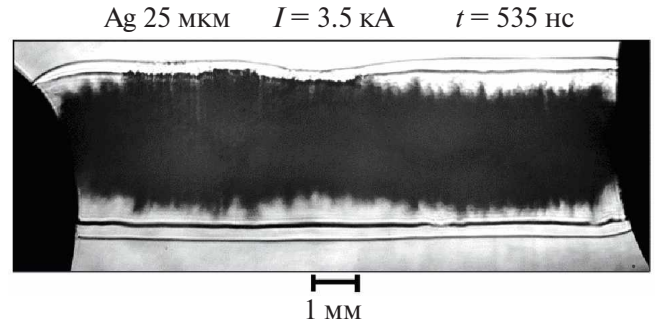
Следует иметь в виду, что теньевые изображения, полученные с помощью лазерного зондирования, принципиально отличаются от радиографических. Ослабление рентгеновского излучения, за счет которого формируется теньевая проекция объекта исследования в радиографии, определяется исключительно плотностью просвечиваемого вещества (интегрально по лучу зрения), причем независимо от его агрегатного состояния. Интерпретация лазерных тенегрмм гораздо сложнее, поскольку зона непрозрачности здесь может иметь самую разную природу. Различие этих двух диагностик демонстрирует, например, рис. 5, где приведены результаты лазерного зондирования (интерферограмма и тенеграмма), а также радиографическое изображение взрыва 4-х медных проволок в диоде сильноточного генератора. Наложение друг на друга в одном масштабе одного из участков теньевых изображений проволоки (рис. 5в) показывает, что видимый диаметр ядра на лазерной фотографии значительно больше, чем на радиографическом изображении –  $\sim 1000$  и  $200 \text{ мкм}$  соответственно. Пространственное



**Рис. 5.** а) Лазерные ( $\lambda = 5324 \text{ \AA}$ ) интерферометрическое и теневое и (б) радиографическое ( $2.5 < \lambda < 5 \text{ \AA}$ ) изображения взрыва 4 медных проволочек; в) наложение одного и того же участка изображений ((а) и (б) – 1 и 2, соответственно).

разрешение лазерной диагностики (10–20 мкм) позволяет “увидеть” объект размером  $\sim 200 \text{ мкм}$ , а резкие границы “радиографического” зерна исключают в качестве причины такого отличия простой спад плотности в расширяющемся веществе. Рентгеновское зондирование, очевидно, дает более правдоподобную оценку размеров зерна.

Однако при ЭВП в воздухе нельзя воспользоваться радиографией, поэтому изображения зерен чаще всего получают именно с помощью лазерного зондирования – как правило, на достаточно поздней стадии разряда, когда продукты взрыва уже сильно расширены (рис. 6). Как следует интерпретировать такие изображения? Тонкие внешние линии на фотографии могут быть только результатом рефракции света на границах плотности, в данном случае на фронте ударной волны и на границе токового слоя. Сложнее понять, как формируется изображение непрозрачного зерна. Если бы, как это часто полагают просто по умолчанию, темная область на месте взорванной проволочки была по преимуществу паром, при расширении в 140 раз по отношению к начальному диаметру его средняя плотность составила бы всего  $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что почти на порядок меньше плотности окружающего воздуха. То есть мы не увидели бы никакой тени на месте “парового” зерна, для лазера он был бы совершенно прозрачным. Находиться в жидком состоянии зерно тоже не может, поскольку жидкость не способна так сильно расширяться. Тем не менее, его хорошо видно на теневой фотографии. Наиболее



**Рис. 6.** Лазерное ( $\lambda = 5324 \text{ \AA}$ ) теневое изображение взрыва серебряной проволочки в воздухе.

подробно возможные механизмы ослабления зондирующего лазерного излучения рассмотрены в работе [34]. Было показано, что среди реальных факторов, отвечающих за формирование изображения, наиболее существенным является эффект рассеяния света при его прохождении через среду, содержащую конгломерат малых (размером менее 1 микрона) частичек вещества. При определенной концентрации капель ослабление прошедшего сквозь них видимого света становится весьма значительным даже в случае сильного расширения материала проволочки. Эффективность же прочих причин (рефракция на границах объекта, отражение и поглощение свободными электронами, молекулярное рассеяние на флуктуациях пара и т.д.) оказывается ничтожной, начиная примерно с десятикратного расширения микронной проволочки. Отсюда следует вывод, что формирование теневых изображений происходит именно в результате рассеяния света при прохождении им капельно-паровой взвеси, содержащей частички конденсированного вещества субмикронного размера.

Сечение рассеяния  $\sigma_0$  света длиной волны  $\lambda$  на сферической капле диаметром  $a \leq \lambda$  описывается формулой

$$\sigma_0 = \frac{4}{3} (2\pi)^5 \frac{5a^6}{\lambda^4}$$

и содержит сильную обратную (рэлеевскую) зависимость от длины волны излучения. Следовательно, доля прошедшего без рассеяния света должна резко возрастать при переходе к большим длинам волн. Действительно, эффект “просветления” был подтвержден экспериментами по взрыву в вакууме и в воздухе проволочек из золота и молибдена при использовании одновременной регистрации изображений разрядного промежутка на основной и второй гармониках излучения лазера на кристалле Nd:YAG [35, 36] (рис. 7).

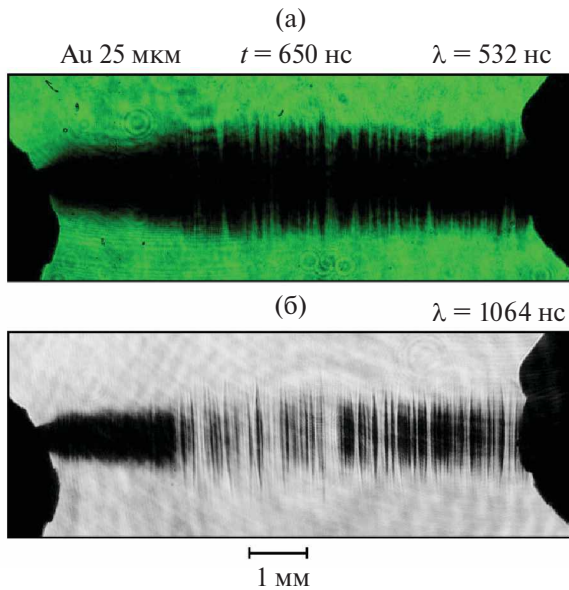


Рис. 7. Лазерное теневое изображение взрыва золотой проволоочки в вакууме в излучении с длинами волн  $\lambda = 532$  нм (а) и  $\lambda = 1064$  нм (б).

Мелкодисперсная среда способна оказывать существенное влияние и на интерферометрическую картину. Многократное рассеяние лазерного пучка при прохождении через вещество, содержащее капли субмикронного размера, приводит к частичной или даже к полной потере когерентности излучения. Контрастность интерферометрических полос может снизиться вплоть до их исчезновения при просвечивании керны в видимом диапазоне, но оставаться высокой в инфракрасном, где рассеяние не играет столь значительной роли (рис. 8).

Отметим, что изображения, на которых виден точно такой же “эффект просветления”, ранее публиковались в статьях [37, 38], где описаны эксперименты с применением двухдлинновой интерферометрии продуктов взрыва. Одновременно в них делались утверждения о полном испарении проволоочки, поскольку энерговыход превышал энергию атомизации. Очевидная разница в уровне пропускания излучения с разными длинами волн никак не комментировалась — при том, что тотальность испарения проводника была принципиальным моментом для результирующих выводов. Однако сопоставление изображений, полученных на разных длинах волн, указывает на несомненное присутствие заметной доли микрочастиц в продуктах взрыва. Что противоречит полному испарению и ставит

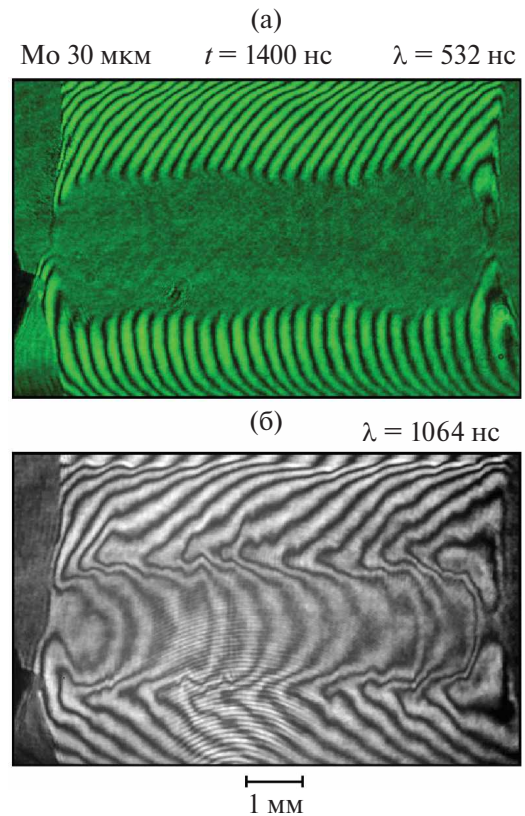


Рис. 8. Интерферометрическое изображение взрыва молибденовой проволоочки в воздухе в излучении с длинами волн  $\lambda = 532$  нм (а) и  $\lambda = 1064$  нм (б).

под сомнение достоверность заявленных результатов.

В качестве еще одного примера того, как привычная система взглядов не позволила авторам развить новые идеи, оттолкнувшись от полученных новых данных, можно привести работу [39]. В ней описан интересный результат по наблюдению рассеяния самосвечения на микрочастицах (каплях) в продуктах взрыва 20-мкм вольфрамового проводника — еще одно экспериментальное подтверждение образования конденсированной фазы в продуктах взрыва проволоочки. Построена теоретическая модель процесса, сделан расчет, показавший хорошее согласие с экспериментом. Однако, оставаясь в рамках традиционной концепции взрыва, авторы не сделали следующего шага: в качестве выводов ко всей работе воспроизводится обычная схема “плавление—испарение—ионизация”, в которую существование конденсированной фазы в виде большого облака микрочастиц диаметром около 0.3 мкм встроено чисто формально, как вариант развития процесса при недостаточном энерговыходе.

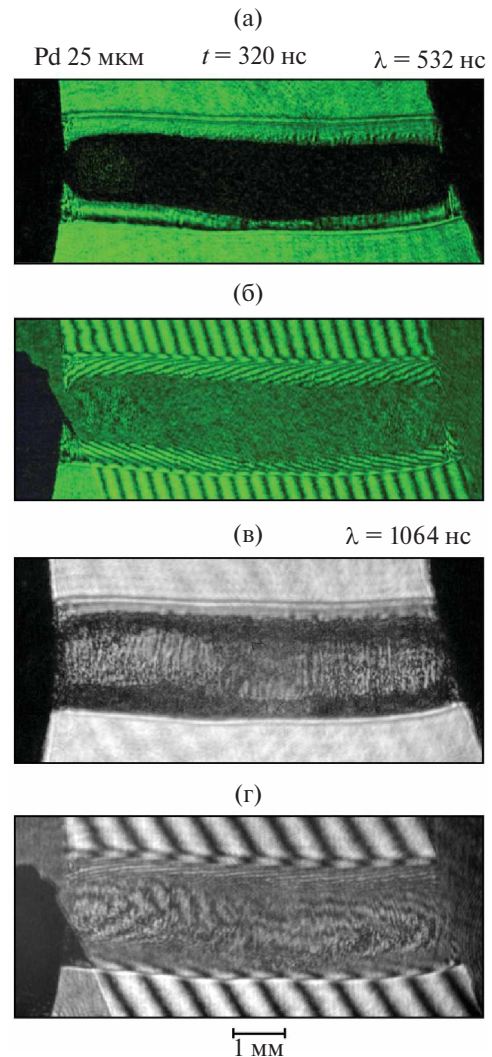


## 5. НЕОДНОРОДНОСТЬ СТРУКТУРЫ КЕРНА

Зондирование ЭВП в ИК диапазоне иногда позволяет гораздо лучше разглядеть внутреннюю структуру керна. Например, в серии выполненных в ФИАН экспериментов по взрыву тонких проволочек в воздухе на изображениях в традиционном “зеленом” свете эта структура часто оказывалась полностью скрытой рассеивающим облаком микрочастиц (рис. 9а, б), тогда как на изображениях в инфракрасном диапазоне хорошо видно, что плотность вещества внутри цилиндрического керна гораздо меньше, чем в его поверхностном слое (в, г), т. е. керна фактически представляет собой полую трубку. Это совершенно не вписывается в изложенную выше традиционную концепцию взрыва проволочки, согласно которой на стадии расширения продукты взрыва представляют собой пар, газо-плазменную смесь или смесь микрокапель и пара [39], что естественным образом подразумевает равномерное распределение вещества по сечению (подобное допущение, ко всему прочему, удобно для количественных оценок и МГД-расчетов). Однако представлению о подобной “однородности” противоречат результаты экспериментов.

Многочисленные экспериментальные (прежде всего радиографические) свидетельства трубчатого строения кернов при ЭВП приведены в статье [3], специально посвященной этой проблеме. Признаком “трубки” на изображениях является, в частности, характерный профиль рентгеновских денситограмм, указывающий на объекты с плотной стенкой и относительно малоплотной центральной частью (рис. 10). Непрозрачная оболочка, скорее всего, жидкая, а вещество внутри трубки, как сначала представлялось, должно находиться в состоянии пенообразной жидко-паровой смеси. Учитывая новые данные по рассеянию, можно предположить, что оно может содержать также некоторое количество частиц субмикронного размера, что находится за пределами пространственного разрешения радиографии, которое составляет порядка микрона.

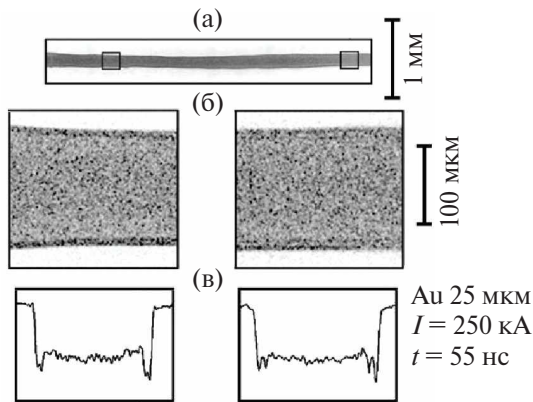
Отметим, что общепринятое представление о стратах – феномене, часто возникающем в рядах ЭВП, – как о чередующихся слоях повышенной и пониженной плотности, то есть как о чем-то похожем на “диски”, становится сомнительным, если иметь в виду подобную структуру керна. Его “пустотелость” плохо сочетается с системой поперечных “слоев” плотного вещества,



**Рис. 9.** Лазерные теневые (а, в) и интерферометрические (б, г) изображения взрыва палладиевой проволочки в воздухе в излучении с  $\lambda = 532$  нм (а, б) и  $\lambda = 1064$  нм (в, г).

а для природных явлений, как правило, не характерна столь сложная и не слишком изящная топология. Образ “плоских слоев” возник, по всей видимости, из-за того, что на лазерных и рентгеновских изображениях страты практически всегда наблюдаются “в профиль”. Сейчас кажется более вероятным, что они формируются в жидкой стенке пустотелого керна (либо нанизаны на него) и, по-видимому, имеют форму колец или тороидов [40]. Этот сложный вопрос требует дальнейших исследований.

Подтверждение экспериментальных данных о трубчатой структуре керна получено с помощью крупномасштабного молекулярно-динамического моделирования взрыва алюминиевой (Al) проволочки [41]. В расчетах кристаллу алюминия диа-



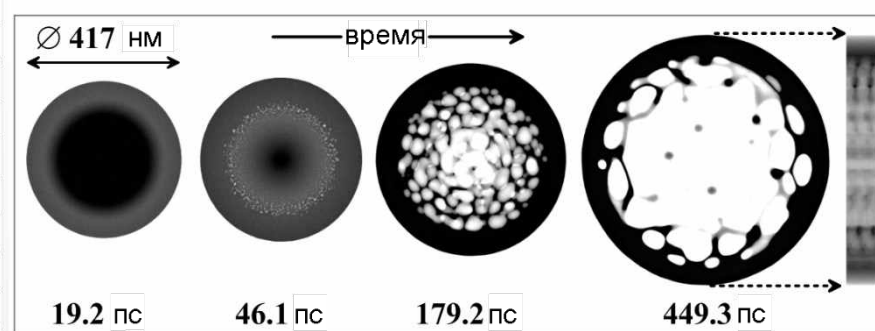
**Рис. 10.** Рентгеновское изображение взрыва проволоки из золота (а); увеличенные участки изображения трубчатого ядра (б); профили денситограмм выделенных фрагментов (в).

метром 400 нм и длиной 40 нм сообщалась начальная энергия, приводящая к нагреву частиц до температуры 6 кК, что имитировало резистивный энергоклад. Моделирование на суперкомпьютере показывает, как в радиальной волне разрежения, распространяющейся к центру цилиндра, термодинамическое давление в какой-то момент становится отрицательным. По мере приближения к центру его амплитуда растет, и после достижения критической прочности на разрыв в жидкости зарождаются пузырьки и возникает волна кавитации. На поверхности цилиндра в это время формируется жидкая оболочка толщиной 40 нм (рис. 11). С поправкой на временной и пространственный масштаб эта картина полностью соответствует экспериментальным изображениям. Еще один известный на данный момент молекулярно-динамический расчет электрического взрыва для существенно разных уровней энерго-

клада продемонстрировал аналогичный результат – образование трубки и дисперсной структуры внутри нее [42]. По-видимому, в настоящее время МД-симуляция является единственным адекватным способом рассчитывать процессы, происходящие в проводнике на стадии взрыва.

Вообще есть все основания полагать, что тенденция к образованию жидкого пустотелого (трубчатого) ядра в окружении продуктов фазового взрыва является базовым сценарием быстрого ЭВП для металлов разных типов [32]. Его конечный результат, однако, может оказаться различным в зависимости от величины энергии, введенной в проволочку к моменту коллапса напряжения. Более того, ключевым фактором здесь, скорее всего, является не только интегральная величина вложенной энергии, но характер ее изменения во времени и в пространстве (по радиусу проводника) на резистивной стадии нагрева. Определяющее значение для сценария взрыва может иметь также помещение проволочки в изоляцию, которая не только способна предотвратить ранний пробой по поверхности, но не позволяет веществу на резистивной стадии расширяться. В результате возникают условия для осуществления принципиально иного (альтернативного) сценария взрыва – без захода вещества в область фазовых переходов и с достижением параметров выше критической точки. Скорее всего, лишь в этом случае можно рассчитывать на полное “испарение” вещества или, точнее, на его непрерывный переход из жидкого в газовое состояние.

Конечно, до окончательного построения теоретической модели ЭВП пока далеко, но уже понятно, что она обязательно должна учитывать



**Рис.11.** Молекулярно-динамическое моделирование взрыва Al проволочки. Снимки карты плотности  $\rho(x, y)$ , усредненной по длине цилиндра  $l_z = 40.2$  нм. Оттенок серого пропорционален плотности. Каждый пиксель представляет собой область размером  $1 \times 1$  нм<sup>2</sup>, в которой могут разместиться ~2400 атомов. Пунктирные стрелки указывают на карту плотности бокового обзора  $\rho(x, z)$ , усредненную по  $l_y = 800$  нм.

существенное различие процессов фазовых преобразований во внешней и внутренней частях нагрузки. Прежде всего это связано со степенью воздействия на электроны проводимости собственного магнитного поля тока, которое равно нулю на оси цилиндрической нагрузки и возрастает до максимального значения на ее поверхности. Соотношение величин циклотронной частоты  $\omega_{cl}$ , пропорциональной полю, и частоты  $\nu$  столкновений электронов с решеткой, растущей с температурой, представляет степень замагниченности вещества, которая появляется, когда отношение частот  $\omega_{cl}/\nu$  достигает единицы. Это определяет границу раздела двух областей вещества. Во внешнем слое, где вещество ядра замагничено, развивается взрывное испарение (фазовый взрыв) и образуется вещество будущей короны, в которой затем происходит пробой. Этот процесс не захватывает приосевую область, где поле мало и вещество не замагничено. Ближе к оси в ходе “кавитационного взрыва” образуется расширяющийся трубчатый керн. Полного испарения не происходит даже при большом энергокладе, если только параметры взрыва не обеспечивают “обход” области фазовых переходов; в этом случае давление на оси нагрузки должно значительно превышать критическое. Более подробно теоретический сценарий взрыва проволоки рассмотрен в работе [43].

Помимо рассмотренных выше процессов, существуют и другие представления “традиционной парадигмы”, ожидающие критического рассмотрения и, возможно, пересмотра. В частности, в литературе по ЭВП регулярно используется понятие “интеграл действия”, введенное еще в 1959 г. в качестве некоторой константы взрыва (для данного металла) и эквивалента удельного энергоклада, однозначно связывающего его с удельной проводимостью вещества. Однако при более сложных, чем начальный нагрев и плавление, фазовых трансформациях вещества — полного представления о которых до сих пор нет — использование интеграла действия для количественных оценок становится некорректным. Это понятие хорошо работает для “медленных” (по старой классификации) взрывов, тогда как применение его в современных исследованиях ЭВП скорее дань традиции, чем сколько-нибудь надежный способ правильно рассчитать параметры взрыва.

Еще одна проблема ЭВП, требующая более глубокого осмысления, связана с представлением о магнитном давлении электрического тока разряда как об основном факторе удержания вещества в ходе его резистивного нагрева. Общим местом является утверждение о том, что бурное расширение (взрыв) проволоки инициируется “снятием магнитного давления” в результате поверхностного пробоя проводника и ухода тока в корону. Это согласуется с хорошо установленной зависимостью момента взрыва от состояния поверхности проводника, а также от наличия у него изолирующего покрытия или помещения в плотную среду. Одновременно существует точка зрения, что в начальной, доплазменной стадии ЭВП магнитное поле не играет существенной роли в балансе сил, удерживающих нагретое вещество от разлета, потому что в обычных, не сильноточных взрывах величина магнитного давления ( $10^2$ – $10^3$  атм) совершенно недостаточна для противодействия тепловому давлению ( $\sim 10^6$  атм). В отличие от его роли в инициации фазового взрыва, для чего как раз требуется магнитное давление порядка сотен атмосфер. Вообще в концепции фазового взрыва “триггером” взрывного расширения является возрастающее, а не исчезающее магнитное поле, а совпадение начала взрыва с моментом пробоя по поверхности должно рассматриваться в рамках общего сценария трансформации вещества, поскольку уход тока из ядра не может быть одномоментным. Экспериментально соотношение между моментами начала взрыва (скачок сопротивления) и шунтирования изучалось в работе [9] в микросекундных разрядах, в основном для тугоплавких металлов, при этом применялось искусственное прерывание тока. Аналогичных измерений для быстрых ЭВП пока не существует, и вопрос о роли снятия магнитного поля для старта взрывного расширения все еще остается открытым.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный обзор основных положений “новой парадигмы” электрического взрыва проволоки (ЭВП) призван способствовать пересмотру ряда устаревших, но все еще слишком привычных взглядов на сложнейшие процессы фазовых преобразований в металле, а также на некоторые некорректные трактовки экспериментальных данных. В качестве основных выводов отметим следующее.

1. Сценарий электрического взрыва проводочки, основанный на представлении о вложении энергии в виде цепочки нагрев—плавление—испарение—ионизация, происходящих одновременно во всем объеме вещества, не соответствует современным экспериментальным данным.

2. В подавляющем большинстве случаев при ЭВП в вакууме и газе образуется структура керн—корона, причем на определенной стадии процесса керн является плотным образованием с четко выраженной границей, видимой, как правило, только на рентгенограммах с высоким пространственным разрешением. Оптические изображения не дают полного представления о структуре канала ЭВП.

3. Канал ЭВП может одновременно содержать вещество в различных агрегатных состояниях: конденсированное вещество (золь, капли, пыль), пар, плазма. Поэтому неверно судить о фазовом состоянии керна исключительно по интегральному энерговкладу: вложение энергии в вещество на резистивной стадии неоднородно и не обязательно приводит к его полному испарению даже при больших энерговкладах.

4. Образование полой (трубчатой) структуры керна на определенной стадии ЭВП является скорее правилом, чем исключением, как и в целом неоднородность его строения, сохраняющаяся долгое время после окончания нагрева.

5. Анализ экспериментальных данных должен проводиться на основании представления о многофазной структуре канала ЭВП; в частности, при рассмотрении изображений, полученных с помощью лазерного зондирования, необходимо учитывать рассеяние света на микрочастицах.

6. Вообще адекватное и полное представление о структуре канала ЭВП может быть получено только при комплексном исследовании с одновременным использованием нескольких диагностических методик: лазерного зондирования на нескольких длинах волн, рентгенографии, эмиссионной и абсорбционной спектроскопии в различных спектральных диапазонах, включая ультрафиолетовый и рентгеновский, резонансное поглощение и др.

7. Сложность и разнообразие исследуемых процессов требует максимально полного привлечения данных из самых разных источников при построении теорий ЭВП.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана грантом РНФ No. 19-79-30086-Р.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bennet F.D.* High-Temperature Exploding Wires / In Progress in High Temperature Physics and Chemistry / Ed. by Carl A. Rouse. Pergamon Press, 1968. V. 2. P. 3.
2. *Müller W.* / In Exploding Wires / Ed. by W.G. Chace and H.K. Moore. New York: Plenum Press, 1959. V. 1. P. 186.
3. *Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Hoyt C.L., Douglass J.D., Tilikin I.N., Mingaleev A.R., Romanova V.M., and Hammer D.A.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. V. 43. N. 8. 2520. doi:10.1109/TPS.2015.2440101.
4. *Chace W.G. and Levine M.A.* // J. Appl. Phys. 1960. V. 31. P. 1298.
5. *Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.* Электрический взрыв проводников и его использование в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат. 1990. 288 с.
6. *Oreshkin V.I. and Bakshat R.B.* Wire Explosion in Vacuum. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. Vol. 48. № 5. P. 2114.
7. *Лебедев С.В., Хайкин С.Э.* // ЖЭТФ. 1954. Т. 26. В. 5. С. 629.
8. *Лебедев С.В.* // ЖЭТФ. 1957. Т. 32. В. 2. С. 199.
9. *Лебедев С.В., Савватимский А.И.* // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19. В. 6. С. 1184.
10. *Лебедев С.В., Савватимский А.И.* // Теплофизика высоких температур. 1970. Т. 8. В. 3. С. 524–531.
11. *Лебедев С.В., Савватимский А.И.* // УФН. 1984. Т. 144. В. 2. С. 215–250.
12. *Wrana J.* // Arch. Elektrotechn. 1939. В. 33. Н. 10. S. 656.
13. *Bennett F.D., Kahl G.D., Wedemeyer E.H.* // In Exploding Wires / Ed. by W.G. Chace and H.K. Moore, New York: Plenum Press, 1964. V. 3. P. 65.
14. *Bennett F.D., Kahl G.D.* // In Exploding Wires / Ed. by W.G. Chace and H.K. Moore, New York: Plenum Press, 1968. V. 4. P. 1.
15. *Edelson H.D. and Korneff T.* // In Exploding Wires / Ed. by W.G. Chace and H.K. Moore, N. Y.: Plenum Press, 1964. V. 3. P. 267.
16. *Kalantar D.H. and Hammer D.A.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. No. 23. P. 3806.
17. *Иваненков Г.В., Мингалеев А.Р., Пикуз С.А., Романова В.М., Степневски В., Хаммер Д., Шелковенко Т.А.* // ЖЭТФ. 1998. Т. 114. В. 4(10). С. 1216.
18. *Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Mingaleev A.R., Hammer D.A., Neves H.P.* // Physics of Plasmas. 1999. V. 6. No. 11. P. 4272.
19. *Chace W.G.* // Physics of Fluid. 1959. V. 2. N. 2. P. 230.

20. Мартынюк М.М. Фазовый взрыв в метастабильной жидкости. // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13. В. 2. С. 213.
21. Воробьев В.С., Малышенко С.П. // ЖЭТФ. 1997. Т. 111. В. 6. С. 2016.
22. Воробьев В.С., Малышенко С.П., Ткаченко С.И., Фортвов В.Е. // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 75. В. 8. С. 445.
23. Воробьев В.С., Малышенко С.П. // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. В. 6. С. 1005.
24. Lebedev S.V., Beg F.N., Bland S.N., Chittenden J.P., Dangor A.E., Haines M.G., Zakauallah M., Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Hammer D.A. // Rev. Sci. Instr. 2001. V. 72. N. 1. P. 671.
25. Hammer D.A. and Sinars D.B. // Laser and Particle Beams. 2001. V. 19. P. 377.
26. Грабовский Е.В., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Порофеев Ю.И. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 2. С. 139.
27. Sinars D.B., Cuneo M.E., Yu E.P., Bliss D.E., Nash T.J., Porter J.L., Deeney C., Mazarakis M.G., Sarkisov G.S., and Wenger D.F. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. No. 14. P. 145002.
28. Cuneo M.E., Waisman E.M., Lebedev S.V. et al. // Phys. Rev. E. 2005. V. 71. P. 046406.
29. Sinars D.B., Cuneo M.E., Yu E.P., Lebedev S.V., Cochran K.R., Jones B., MacFarlane J.J., Mehlhorn T.A., Porter J.L., and Wenger D.F. // Phys. of Plasmas. 2006. V. 13. P. 042704.
30. Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Смирнов В.П. и др. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 11. С. 1023.
31. Wu J., Wang L.P., Han J.J., Li M., Sheng L., Li Y., Zhang M., Guo N., Lei T.S., Qiu A.C., and Lv M. // Phys. of Plasmas. 2012. V. 19. P. 022702. doi:10.1063/1.3677777.
32. Романова В.М., Иваненков Г.В., Мингалева А.Р., Тер-Оганесьян А.Е., Шелковенко Т.А., Пикуз С.А. // Физика плазмы. 2015. В. 41. С. 671.
33. Гуськов С.Ю., Иваненков Г.В., Пикуз С.А., Шелковенко Т.А. // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 11. С. 958.
34. Колгатин С.Н., Лев М.Н., Перегуд Б.П., Степанов А.М., Федорова Т.А., Фурман А.С., Хачатурьянц А.В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 9. С. 123.
35. Romanova V.M., Ivanenkov G.V., Parkevich E.V., Tilikin I.N., Medvedev M.A., Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., and Selyukov A.S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2021. V. 54. P. 175201. doi:10.1088/1361-6463/abdce5.
36. Романова В.М., Тиликин И.Н., Тер-Оганесьян А.Е., Мингалева А.Р., Шелковенко Т.А., Хирьянова А.И., Пикуз С.А. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 2. С. 141. doi:10.31857/S0367292122020135.
37. Wu Jian, Li Xingwen, Lu Yihan, Lebedev S.V., Yang Zefeng, Jia Shenli, and Qiu Aici. // Physics of Plasmas 23, 112703 (2016).
38. Sarkisov G.S., Hamilton A., and Sotnikov V. // Phys. Rev. A. 2019. V. 99. 012503.
39. Sarkisov G.S., Sasorov P.V., Struve K.W., and McDaniel D.H. // Jour. Appl. Phys. 2004. V. 96. P. 1674.
40. Romanova V.M., Mingaleev A.R., Ter-Oganesyanyan A.E., Shelkovenko T.A., Pikuz S.A. // ВАИТ. 2013. № 1(83). P. 284.
41. Zhakhovsky V.V., Pikuz S.A., Tkachenko S.I., Sasorov P.V., Shelkovenko T.A., Knapp P.F., Saylor C.C., and Hammer D.A. // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1426. P. 1207.
42. Lv F., Liu P., Qi H., Liu J. // Computational Materials Science. 2019. V. 162. P. 88. doi:10.1016/j.commatsci.2019.02.026.
43. Romanova V.M., Ivanenkov G.V., Mingaleev A.R., Ter-Oganesyanyan A.E., Tilikin I.N., Shelkovenko T.A., and Pikuz S.A. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. P. 112704. doi:10.1063/1.5052549.

**ELECTRIC EXPLOSION OF THIN WIRES (A PARADIGM SHIFT)****V. M. Romanova<sup>a, \*</sup>, I. N. Tilikin<sup>a</sup>, A. E. Ter-Oganesyan<sup>a</sup>, A. R. Mingaleev<sup>a</sup>,  
T. A. Shelkovenko<sup>a</sup>, and S. A. Pikuz<sup>a</sup>***<sup>a</sup>Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia**\*e-mail: vmr@inbox.ru*

Over the many decades of studying the electric explosion of thin wires (EEW), researchers have developed and accepted certain notions about this process. Despite the lack of proof behind certain established assertions and, sometimes, their contradiction with the results of recent experiments, they are still widely used to describe and interpret new data. In the first place, this concerns the concept that the EEW is a fast evaporation of metal as a result of the dissipation of Joule energy inside it. Another fundamental notion that is used during the analysis of the experimental results and in model calculations is the uniform distribution of matter along the cross section of the wire core during the explosion. To date, the nature and mechanism of the appearance of strata, i.e., the periodicity observed in many images of the EEW, remain unexplained. Using the traditional notions of the EEW, even in experiments conducted at a high level, does not allow one to correctly interpret the obtained results and, as a whole, does not facilitate the progress in understanding the complicated physics of the process of wire explosion. Therefore, the traditional concepts of the EEW have long required a revision. This work summarizes the results of modern research in this area and considers its relation to the previous works. It also proposes new approaches to the studies of the EEW dynamics and to the understanding of the processes of energy transformation in matter during its rapid heating by the electric current.

*Keywords:* electric explosion of wires, core–corona structure, condensed matter, phase transitions, X-ray analysis, laser probing