

УДК 533.59; 533.9

## Разработка методики исследования газовой фазы электрического взрыва проводников

Л. И. Уруцкоев, Д. В. Филиппов, А. А. Рухадзе, А. О. Бирюков, А. А. Марколия, К. А. Алабин, Г. В. Шпаковский, Г. К. Стешенко, А. А. Леванов, П. В. Белоус

*Изложены методы определения химического состава газа, образующегося в результате сильноточного электрического взрыва вольфрамовой проволоочки. Подробно описана методика измерения количества частиц с массой  $m = 4$  а.е.м., обнаруживаемых во взрывной камере после электровзрыва. Обсуждены возможные источники погрешности измерений и результаты проверочных экспериментов. Приведены результаты измерений временных зависимостей давления и количества частиц  $m = 4$  а.е.м., поведение которых оказалось весьма неожиданным.*

PACS: 52.80.Qj, 07.30.-t, 07.75.+h, 52.70.Nc

*Ключевые слова:* электрический взрыв проволоочки, химический состав газа, гелий, масс-спектрометр, вольфрам, слабые ядерные взаимодействия.

### Введение

Электрический взрыв проводников (ЭВП) является процессом, весьма богатым на интересные физические явления. В зависимости от фазы электровзрыва вещество проводника (проволочка, фольга) пребывает в различных агрегатных состояниях: конденсированном, жидком, газообразном и плазменном. Более того, как правило, в течение некоторого времени проволоочка пребывает во всех четырех состояниях одновременно. Представляется очевидным, что создание детальной

физической модели столь сложного процесса является весьма непростой задачей. Явление ЭВП в различных средах интенсивно изучается как экспериментально, так и теоретически на протяжении последних 60 лет, что нашло свое отражение в огромном количестве научных публикаций, посвященных этому вопросу. Результаты научных исследований обобщены в ряде обзоров [1] и монографий [2, 3].

Явление ЭВП является привлекательным объектом как для фундаментальных, так и прикладных исследований. Как объект фундаментальных исследований, ЭВП интересен тем, что в веществе взрывающейся проволоочки термодинамические параметры (температура и плотность) достигают экстремальных значений. Это обстоятельство позволяет изучать термодинамику фазовых переходов и поведение вещества вблизи критической точки путем модификации уравнения состояния вещества, лежащего в основе численного моделирования [1, 3, 4]. В прикладном и технологическом плане ЭВП интересен как мощный источник мягкого рентгена [5, 6], импульсный нейтронный источник [7], обостритель электрической мощности в высоковольтной импульсной технике [2] и способ получения нанопорошков [8].

Но несмотря на масштаб проведенных исследований и существование многочисленных полуэмпирических численных моделей, ряд принципиальных физических вопросов до сих пор представляется не до конца выясненным. Так, относительно недавно появился ряд публикаций, в которых утверждается о наблюдении факта протекания низкоэнергетических ядерных реакций при электровзрыве титановых фольг в жидкости [9—11]. На сегодняшний день в научном сообществе об-

**Уруцкоев Леонид Ирбекович**, главный научный сотрудник.  
**Филиппов Дмитрий Витальевич**, ведущий научный сотрудник.

**Бирюков Артем Олегович**, аспирант.

**Алабин Кирилл Алексеевич**, аспирант.

Московский государственный университет печати им. И. Федорова.

Россия, 127550, Москва, ул. Прянишникова, 2А.

E-mail: urleon@yandex.ru; ar.biryukov@gmail.com

**Рухадзе Анри Амвросьевич**, главный научный сотрудник.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

E-mail: rukh@fpl.gpi.ru

**Марколия Алмасхан Анатольевич**, младший научный сотрудник.

Сухумский физико-технический институт.

Республика Абхазия, 384914, Сухум, Синоп, Кодорское шоссе, 665.

**Шпаковский Тимофей Владимирович**, студент.

**Стешенко Георгий Константинович**, студент.

**Леванов Алексей Александрович**, студент.

**Белоус Павел Витальевич**, студент.

Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, МО, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 22 марта 2012 г.

© Уруцкоев Л. И., Филиппов Д. В., Рухадзе А. А., Бирюков А. О., Марколия А. А., Алабин К. А., Шпаковский Т. В., Стешенко Г. К., Леванов А. А., Белоус П. В., 2012

щепризнанным является мнение о том, что при ЭВП могут протекать только реакции ядерного синтеза (типа D+D и то при гигантских значениях вложенной мощности) [7] и поэтому результаты работ [9—11] считаются ошибочными. Это мнение основывается на том, что поскольку энергетический масштаб атомных и ядерных процессов различается в  $10^5$  раз, то вероятности ядерных процессов зависят только от состояния ядра и не зависят от внешних условий, в том числе от состояния атомной электронной оболочки.

Действительно, до середины прошлого века ядерные распады считались абсолютными эталонами времени, что и отражено в самом названии "постоянная радиоактивного распада". Однако позднее, в конце 50-х годов прошлого века, стало ясно, что ядерные и атомные явления тесно связаны. Осознание роли слабых ядерных взаимодействий электронных оболочек в жизни ядер позволило теоретикам создать новые представления и тем самым стимулировать экспериментальные исследования [12—14]. Достаточно быстро были получены надежные экспериментальные результаты, в которых были зарегистрированы изменения в периодах полураспада  ${}^7\text{Be}$  [13] и метастабильного  ${}^{99}\text{Tc}^m$  [14], возникающих вследствие деформации атомных электронных оболочек в различных химических соединениях. Однако и после этого долгое время считалось, что влияние атомных электронов на ядерные распады является лишь малой поправкой. Развитие теории  $\beta$ -распада в связанное состояние электрона, т. е. распада, при котором электрон не покидает атом, а занимает свободную орбиту (60-е годы прошлого века), и ее экспериментальное подтверждение показали, что влияние атомной оболочки на периоды распада ядер может быть существенным. Так, например, ядра  ${}^{163}\text{Dy}$ ,  ${}^{193}\text{Ir}$ ,  ${}^{205}\text{Tl}$  абсолютно стабильные в нейтральном атоме становятся  $\beta$ -активными при полной ионизации атома [15], а полная ионизация  ${}^{187}\text{Re}$  уменьшила период полураспада в  $10^9$  раз (ЦЕРН, 1996 г.) [16]. Таким образом, в конце прошлого столетия было экспериментально установлено, что ядерные и атомные явления связаны гораздо теснее, чем считали ранее.

Оказалось, что, помимо ионизации атома, существует другая, более эффективная возможность влияния на периоды ядерных процессов. Теоретически показано [17], что для ряда атомов наложение сверхсильного магнитного поля приводит к значительному увеличению вероятности  $\beta$ -распада за счет возникновения дополнительного канала  $\beta$ -распада в связанное состояние электрона. В свою очередь, дополнительный канал возникает из-за резкого увеличения фазового объема конечных состояний, которые может занять  $\beta$ -электрон.

До недавнего времени считалось, что сверхсильные поля существуют только на нейтронных звездах. Однако благодаря бурному развитию лазерной техники ситуация изменилась. Экспериментально показано, что в земных условиях достижение сверхсильных магнитных полей ( $\sim 10^9$  Гс) возможно при использовании фемтосекундных лазеров.

Принято считать, что вероятность  $\alpha$ -распада определяется исключительно сильными ядерными взаимодействиями. Однако еще в 1957 г. V. Erima опубликовал статью [18], в которой теоретически показал, что наличие электронной оболочки атома увеличивает вероятность  $\alpha$ -распада по отношению к вероятности  $\alpha$ -распада полностью ионизованного атома. Во-первых, поле атомных электронов снижает барьер для  $\alpha$ -частицы, и, во-вторых, при  $\alpha$ -распаде заряд ядра уменьшается на две единицы, что приводит к изменению энергии электронной оболочки. Учет влияния атомных электронов приводит к тому, что при расчете постоянной  $\alpha$ -распада энергию  $\alpha$ -частицы следует заменить "эффективной" энергией, которая больше реальной  $E \rightarrow E + 73Z^{4/3} + 65Z^{5/3}$  эВ. Из-за экспоненциальной зависимости вероятности  $\alpha$ -распада от энергии  $\alpha$ -частицы  $\ln p \propto \text{const} - \sqrt{E}^{-1}$  влияние атомных электронов может быть значительно. Как и следовало ожидать, атомные электроны сильнее влияют на процессы, идущие с малыми энергиями. Например, для  ${}^{147}\text{Sm}$  (энергия  $\alpha$ -частиц  $\sim 2,31$  МэВ;  $T_{1/2} = 7 \cdot 10^{11}$  лет) наличие электронной оболочки увеличивает вероятность  $\alpha$ -распада в 2,6 раза по сравнению с ядром полностью ионизованного атома [18]. И наоборот, можно показать, что при помещении  $\alpha$ -активного атома в магнитное поле, при котором ларморовский радиус электрона становится меньше радиуса первой бортовой орбиты, должно наблюдаться увеличение вероятности  $\alpha$ -распада. Таким образом, из современных теоретических представлений следует, что электромагнитные взаимодействия могут заметно влиять на период  $\alpha$ -распада.

В 1970 г. была опубликована экспериментальная работа [19], из которой следует, что при  $\alpha$ -распаде  ${}^{16}\text{N}$  наблюдается нарушение пространственной четности. Величина эффекта, зарегистрированного в [19], была невелика  $\sim 10^{-2}$ , но поскольку нарушение пространственной четности свойственно для слабых ядерных взаимодействий, то, следовательно, в явлении  $\alpha$ -распада участвуют все три вида ядерных взаимодействий: электромагнитное, слабое и сильное. Хотя роль каждого из этих трех видов взаимодействия в механизме  $\alpha$ -распада далеко не равнозначна.

Еще в 1922 г., т. е. задолго до того, как сформировались современные представления об уст-

ройстве ядра, два американских химика G. Wendt and C. Igion опубликовали интересную работу, посвященную исследованию электровзрыва вольфрамовой проволоочки в вакууме [20]. Авторы этой работы исходили из нескольких фактов, надежно установленных к тому времени. Так, с помощью спектрального анализа света, приходящего к нам от Солнца и звезд, было установлено, что в видимом спектре не содержатся характерные оптические линии, принадлежащие тяжелым химическим элементам, а температура Солнца составляет  $\sim 6 \cdot 10^3$  К. Незадолго до этого в экспериментах Андерсена [21] было показано, что если разрядить конденсаторную батарею на маленькую проволоочку, то температура образующейся при этом плазмы достигает  $2 \cdot 10^4$  К.

Основываясь на этих фактах, американские ученые предположили, что отсутствие спектральных линий тяжелых химических элементов в спектре излучения звезд объясняется тем, что тяжелые химические элементы неустойчивы при солнечной температуре. Тогда, рассудили они, взяв тонкую проволоку из тяжелого химического элемента, например, вольфрама и пропуская через нее сильный электрический ток (т. е. нагрев ее до  $2 \cdot 10^4$  К), можно было бы наблюдать разложение (они это называли "декомпозицией") атомов вольфрама. Они весьма тщательно подготовили и блестяще провели эксперимент, пользуясь при этом весьма простыми средствами. Электровзрыв вольфрамовой проволоочки проводился в стеклянной колбе, которая перед этим тщательно обезгаживалась, откачивалась до высокого вакуума, а затем отпаивалась. По утверждению авторов этой работы, спектральный анализ газа, образовавшегося в результате электровзрыва, выявил присутствие характерной линии гелия  $^4\text{He}$  во всех проведенных ими опытах. Другим, не менее важным утверждением авторов, является тот факт, что спектральный анализ не показывал характерных водородных линий ни в одном из проведенных ими опытов. Последнее обстоятельство как раз и подчеркивает тщательность подготовки эксперимента, поскольку, как всем хорошо известно, избавление от присутствия водорода в системе не является простой технологической задачей и на сегодняшний день. Таким образом, если продекларированный в [20] результат не является артефактом, то это означает, что ЭВП инициирует  $\alpha$ -распад какого-либо из изотопов вольфрама.

Вполне понятно, что публикация работы [20] вызвала резонанс в научном сообществе того времени. Э. Резерфорд выразил глубокое сомнение в том, что использовавшееся в эксперименте напряжение ( $\sim 30$  кВ) являлось достаточным для того, чтобы электроны могли индуцировать ядерные реакции. Для проверки достоверности опублико-

ванных результатов Резерфорд использовал 100-кВ электронный пучок и вольфрамовую мишень. Он направил пучок на мишень и не пронаблюдал никакой ядерной реакции, о чем в достаточно резкой форме и сделал короткое сообщение в [22]. G. Wendt вступил в научную дискуссию с Резерфордом, отметив, что причиной расхождения результатов может быть различие в подводимой к вольфрамовой мишени мощности [23]. Другими словами, мощность, выделяемая в проволочке при разряде конденсатора, намного больше той, которую использовал Резерфорд в его пучке электронов. Тем не менее, научное сообщество приняло сторону Резерфорда, а работа [20] была признана ошибочной и забыта.

В дальнейшем следует заметить, что для всех пяти изотопов вольфрама  $\alpha$ -распад является энергетически выгодным процессом. Более того, достаточно недавно был измерен период полураспада одного из изотопов  $^{180}\text{W}$ , который оказался равным  $T_{1/2} = (1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{18}$  лет [24]. Таким образом, результаты работы [20] не находятся в прямом противоречии с законом сохранения энергии, но сильно противоречат вероятностным законам.

Тем не менее, авторы данной работы решили проверить результаты работы [20], опираясь на современные теоретические представления и диагностические методы. На первый взгляд может показаться, что поскольку электровзрыв вольфрамовых проволочек исследовался различными группами ученых особенно тщательно и никто никогда не сообщал о наблюдении спектральных линий гелия, то Резерфорд был прав и эффект отсутствует. Но, с другой стороны, авторам так и не удалось обнаружить ни одной публикации, где бы сообщалось об исследовании химического состава газа, который всегда обнаруживается во взрывной камере после электровзрыва.

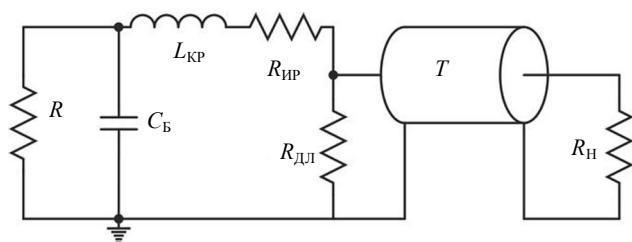
Целью методической работы, описываемой в данной статье, являлась разработка диагностических методик, позволяющих надежно регистрировать и измерять малые количества гелия, обеспечивающие парциальное давление  $\sim 10^{-6}$  от общего давления.

### Описание экспериментальной установки

Эксперименты по электрическому взрыву вольфрамовой проволоочки проводились на установке под названием ГЕЛИОС. Установка состоит из четырех конденсаторов типа ИМН 100-0,1 емкостью  $C = 0,1$  мкФ, соединенных параллельно. Индуктивность каждого конденсатора 150 нГн. Для уменьшения общей индуктивности ошиновка конденсаторов выполнена из листовой меди толщиной 1 мм. Зарядка конденсаторов осуществлялась с помощью источника питания АИИ-70 через со-

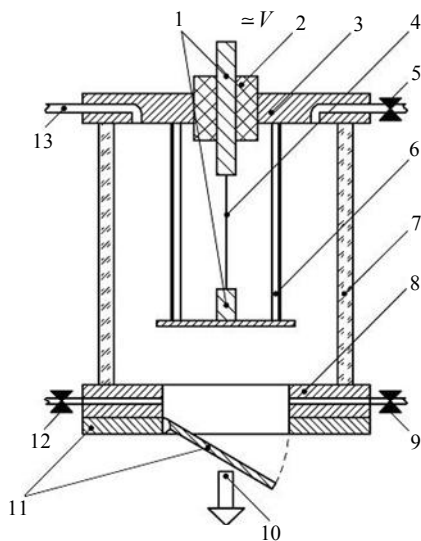
противление и выпрямитель до напряжения  $U = 35\text{--}40$  кВ. Система запускалась с помощью воздушного управляемого трехэлектродного разрядника, обладающего малой индуктивностью. Для соединения разрядника с взрывной камерой использовались восемь параллельно соединенных радиочастотных кабеля (волновое сопротивление  $\rho = 50$  Ом, погонная индуктивность  $L = 200$  нГн/м), которые имели длину по два метра каждый.

На рис. 1 представлена эквивалентная электротехническая схема экспериментальной установки ГЕЛИОС.



**Рис. 1. Расчетная схема разрядного контура установки:**  $R$  — зарядное сопротивление;  $L_{\text{кр}}$  — суммарная индуктивность конденсаторов и разрядника;  $R_{\text{ИР}}$  — сопротивление искры разрядника;  $R_{\text{ДЛ}}$  — согласующее сопротивление;  $T$  — соединительные кабели, представленные в виде эквивалентной длинной линии;  $R_{\text{Н}}$  — сопротивление нагрузки;  $C_{\text{Б}}$  — емкость конденсатора

При электровзрыве вольфрамовой проволоочки использовались взрывные камеры как из тянутого кварца марки КВ-3 (внутренний диаметр 55 мм, высота 110 мм, толщина стенки 2—3 мм), так и из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т (внутренний диаметр 55 мм, высота 110 мм, толщина стенки 2,5 мм). На рис. 2 представлена схема подобной разрядно-взрывной камеры.



**Рис. 2. Схема разрядно-взрывной камеры:**

1 — крепежные электроды; 2 — изолятор; 3 — верхний фланец; 4 — проволочка; 5 — натекатель для напуска аргона; 6 — обратный токопровод; 7 — стенка камеры; 8 — нижний фланец; 9 — вентиль для МС-200; 10 — вакуумная откачка; 11 — шибера; 12 — клапаны для МС-40; 13 — отверстие для подключения лампы измерения давления

Рабочий объем взрывной камеры составлял  $V_0 \approx 250$  см<sup>3</sup>, а общий объем до места установки шибера, включая все технологические отростки, —  $V_{\Sigma} \approx 400$  см<sup>3</sup>. Для очистки внутренней поверхности камеры использовался высокочастотный тлеющий разряд в атмосфере аргона, что позволило значительно снизить количество газа, адсорбированного стенками. Тлеющий разряд осуществлялся в проточном режиме. Напуск аргона реализовывался с помощью натекателя 5, расположенного в верхней части камеры.

Вакуумная откачка 10 камеры осуществлялась до давления  $\sim 10^{-4}$  Па с помощью безмасляного спирального вакуумного насоса Varian SH-110 (предел  $\sim 5$  Па) и турбомолекулярного насоса О1АБ-450-003 (предел  $\sim 4 \cdot 10^{-5}$  Па).

Контакт между электродами 1 и проволочкой обеспечивался за счет цангового уплотнения. В опытах использовались как электроды из вольфрама, так и из нержавеющей стали. Использование последних способствовало уменьшению эмиссии электронов с поверхности электродов, что улучшало воспроизводимость результатов. В экспериментах использовались вольфрамовые проволоочки различного сечения (с диаметром 10, 50, 70, 130 и 200 мкм), а длина варьировались от 24 до 40 мм. Для обезгаживания вольфрамовой проволоочки перед ЭВП ее прогревали током от 0,2 до 2 А (в зависимости от диаметра проволоочки) до температуры  $\sim 1500$  К в течение 0,5—2 ч. Источник для прогрева проволоки был индуктивно развязан с установкой, что позволяло производить электровзрыв, не выключая прогрев (далее по тексту эта процедура обозначается как "горячий старт").

### Описание газовых методик

Насколько нам известно из научной периодики, исследование химического состава газа, образующегося в камере в результате ЭВП, никогда не проводилось. Специфика задачи, поставленной перед данным исследованием, потребовала привлечения газовых диагностических методик. В экспериментах на установке ГЕЛИОС количество газа, образующегося после электровзрыва, составляло всего  $\sim 10^{19}$  частиц. Поэтому была необходима минимизация объема вакуумных трактов, соединяющих камеру и вакуумные приборы, для обеспечения достаточного (для измерений) давления газов. Из-за необходимости размещения измерительного оборудования в непосредственной близости от разрядно-взрывной камеры возникла проблема электрической наводки, решение которой потребовало значительных усилий по адаптации стандартного оборудования, обычно применяемого для изучения состава газовых смесей.

Главная особенность описываемых исследований состояла в самой методике проведения эксперимента. Электровзрыв проводился в режиме, когда вакуумная камера была отсечена от турбомолекулярного насоса. Непосредственно перед подачей электрического импульса разрядно-взрывная камера отсекалась от вакуумной системы с помощью электроприводного шибера 11 (см. рис. 2), управляемого с пульта установки. Время полного перекрытия сечения вакуумной откачки составляло  $\sim 40$  с.

Регистрация давления во взрывной камере осуществлялась с помощью инверсно-магнетронного вакуумметра VARIAN FRG-700 с рабочим диапазоном  $10^{-5}$ — $10^5$  Па, который присоединялся непосредственно к камере через патрубок 13. В основе работы вакуумной лампы FRG-700 лежит ионизационный вакуумметр с холодным катодом, давление в котором является функцией тока, протекающего в таунсендовском разряде. Вакуумметр был связан с контроллером VARIAN AGC-100, данные с которого передавались в компьютер по стандартному протоколу RS-232 как функция времени. Для визуализации и обработки данных было разработано программное обеспечение на языке Object Pascal программной среды Delphi. Такая система позволяла с достаточной точностью ( $\sim 5\%$ ) в режиме реального времени контролировать давление внутри рабочей камеры как до, так и после электровзрыва.

Для качественного исследования состава образующегося газа использовался компактный время-пролетный масс-спектрометр MC-200 [25], который через натекатель 9 подсоединялся к нижнему фланцу 8 камеры с помощью короткой и тонкой медной трубки с диаметром 6 мм. Спектральное разрешение прибора составляло  $R \sim 200$ , что позволяло уверенно идентифицировать основные газы в диапазоне атомных чисел  $m = 2$ —500 а.е.м. Забор газовой пробы осуществлялся непосредственно после электровзрыва проволоочки, что приводило к уменьшению количества газа в камере на  $\sim 10\%$ .

Для измерения количества частиц газа с  $m = 4$  а.е.м. оставшийся в камере газ скачивался с помощью гелиевого течеискателя MS-40 DryCE (далее по тексту MS-40). Прибор MS-40 был разработан компанией VICLeakDetection и предназначен для детектирования и измерения потока атомов  $^4\text{He}$  через течи в вакуумных системах. Течеискатель MS-40 был присоединен через нижний крепежный фланец камеры 8 к разрядной камере с помощью короткой трубки из нержавеющей стали. Между разрядной камерой и трубкой были установлены два (соединенных параллельно) отсекающих клапана 12, которые обладали различными пропускными способностями. Образовавшийся в результате электровзрыва газ скачивался вначале через клапан, имеющий малое отверстие и далее, по мере уменьшения давления в камере, открывал-

ся клапан с увеличенным отверстием. Такая система позволяла наиболее точно измерять поток газа с  $m = 4$  а.е.м. в течение всего процесса откачки газа независимо от величины давления в разрядной камере.

Прибор MS-40 соединялся с внешним компьютером с помощью COM-порта по протоколу RS-232. Данные о результатах измерений в цифровом виде поступали на компьютер, где обрабатывались с помощью специально написанного программного обеспечения. Чувствительность прибора позволяла уверенно регистрировать даже атмосферный гелий и проводить количественные измерения частиц с  $m = 4$  а.е.м., начиная от уровня потока  $\sim 4 \cdot 10^{-11}$  атм·см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>. Погрешность измерений, оцениваемая по уровню шума ( $\sim 10^{-10}$  атм·см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> — паспортные данные), составляла  $\sim 4\%$ . Периодически (через каждые 10 измерений) течеискатель автоматически калибровался по значению потока гелия от внутренней встроенной калибровочной течи с потоком  $\sim 3 \cdot 10^{-8}$  атм·см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>.

Для проверки достоверности данных, получаемых с помощью гелиевого течеискателя MS-40, была проведена серия калибровочных экспериментов. В электровзрывную камеру, предварительно откаченную до давления  $10^{-4}$  Па, напускали известное количество воздуха и, скачивая его через течеискатель, считали количество атомов  $^4\text{He}$ . Для получения статистически достоверных измерений описанная выше процедура проводилась несколько раз для каждого значения давления воздуха. Чтобы учесть нелинейность блока ионизации и детектора MS-40, калибровка проводилась во всем диапазоне давлений (10; 20; 50; 67 Па и т. д.), которые устанавливались во взрывной камере после ЭВП. В результате калибровок было установлено, что экспериментально измеряемое количество частиц  $^4\text{He}$  с хорошей точностью совпадало с количеством  $^4\text{He}$ , теоретически посчитанным для данного объема камеры. Пример для серии измерений при давлении воздуха  $P = 20$  Па представлен на рис. 3.

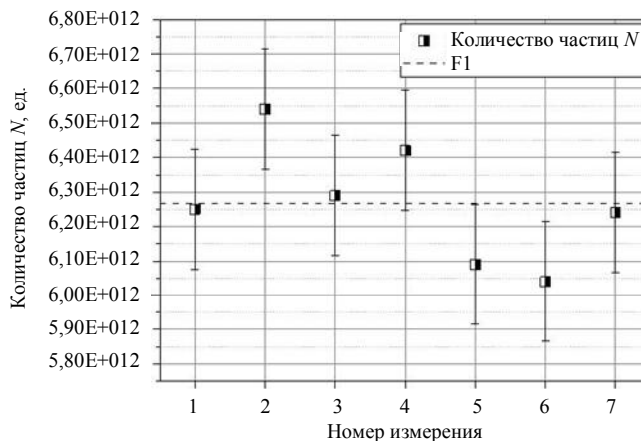


Рис. 3. Серия калибровки на воздухе при давлении  $P = 20$  Па

Низкое разрешение течеискателя по массам не позволяло ему различать  $D_2$  и  $^4He$  при подсчете количества частиц с  $m = 4$  а.е.м., и поэтому калибровка на воздухе не давала полной гарантии достоверности вышеописанной измерительной процедуры. В связи с этим потребовалась разработка специальных калибровочных процедур, которые бы учитывали это обстоятельство. Помимо гелиевого течеискателя было необходимо также калибровать газовый масс-спектрометр и спектральные оптические методики. Поэтому был разработан специальный стенд, схема которого представлена на рис. 4.

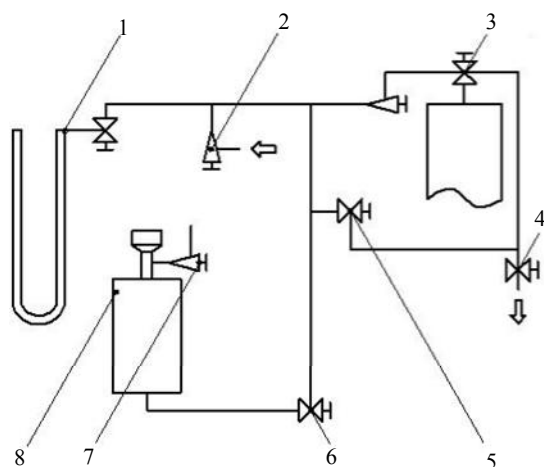


Рис. 4. Схема вакуумного калибровочного стенда:

1 — масляный манометр; 2 — напуск воздуха; 3 — напуск калибровочного газа; 4 — вакуумная откачка; 5 — отсекающий вентиль; 6 — вентиль, отсекающий камеру; 7 — готовая газовая смесь для анализа; 8 — камера вакуумного стенда

Основные элементы стенда: вакуумная камера с известным объемом, U-образный масляный манометр, вакуумная откачка, система вентилей и натекателей, необходимая для предварительной откачки и заполнения камеры гелием и другими газами в нужной концентрации до давления  $10\text{--}10^3$  Па. Объем камеры вакуумного стенда составлял  $(456 \pm 5)$  см<sup>3</sup>. Приготовленная тестовая смесь перепускалась через натекатель в разрядную камеру для последующего анализа с помощью MS-40.

Задачи, решаемые с помощью данного стенда:

- проверка заводской калибровки гелиевого течеискателя MS-40, которая осуществлялась путем напуска в камеру известного количества атомов гелия;
- оценка порога чувствительности масс-спектрометра к малой добавке гелия в газовой смеси с высоким парциальным давлением водорода;
- учет влияния  $D_2$ , содержащегося в водороде, на измерение с помощью MS-40 количества частиц с  $m = 4$  а.е.м.;
- оценка порога чувствительности спектральных методик, используемых для регистрации оптических линий гелия, в зависимости от методов

возбуждения, процентного состава и давления газовой смеси;

В экспериментах, проводимых на установке ГЕЛИОС, наряду с газовыми методиками также применялся целый ряд оптических, фоторегистрирующих и электротехнических диагностик.

### Результаты

Методика непрерывного измерения давления играла важную роль в технологическом процессе подготовки эксперимента (при прогреве проволоки, чистке поверхности взрывной камеры тлеющим разрядом в аргоне, устранении негерметичности уплотнений).

При перекрытой вакуумной откачке скорость роста давления во взрывной камере определяется величиной диффузионного потока со стенок камеры и натеканием атмосферного воздуха, обусловленного неидеальностью уплотнений. Но поскольку диффузионное натекание, связанное с десорбцией,  $Q_d \propto \sqrt{T}$ , а атмосферное натекание  $Q_{ат} \propto T$ , где  $T$  — время, то по виду зависимости скорости натекания от времени можно определить, какой из процессов является определяющим при том или ином давлении. Типичный вид зависимости роста давления от времени после перекрытия шибера представлен на рис. 5. Если из вида кривой роста давления во времени следовало, что диффузионный поток являлся определяющим, то это служило указанием на необходимость дальнейшей очистки поверхности кварцевой камеры тлеющим разрядом. Если давление росло линейно со временем, то определяющим фактором являлось натекание из атмосферы и необходимо улучшать уплотнение вакуумной камеры. Как правило, уровень натекания  $\frac{dP}{dt} = 1\text{--}5$  Па/ч являлся достаточным (учитывая время закрытия шибера), чтобы проводить ЭВП при начальном давлении  $P_0 < 10^{-3}$  Па.

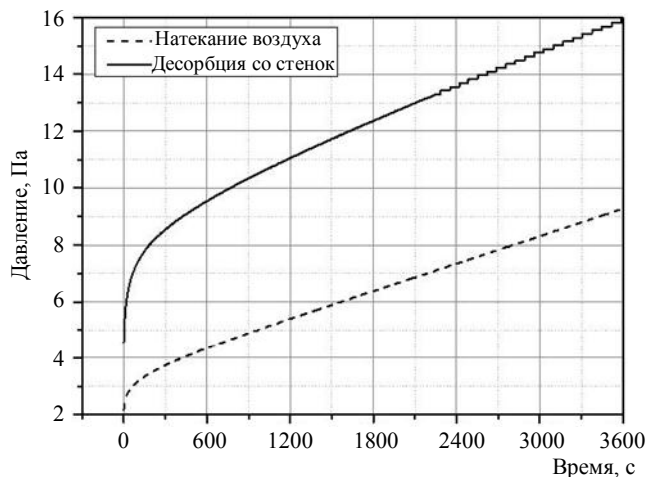


Рис. 5. График зависимости от времени роста давления в камере после перекрытия шибера

После ЭВП в камере регистрировалось давление порядка  $P_1 \sim 50$  Па. Проведенный с помощью масс-спектрометра MS-200 химический анализ газа, возникшего в результате электровзрыва, показал, что примерно на 40 % он состоит из водорода, а остальные 60 % смеси близки по своему составу к воздушной смеси. Типичный спектр газовых масс представлен на рис. 6.

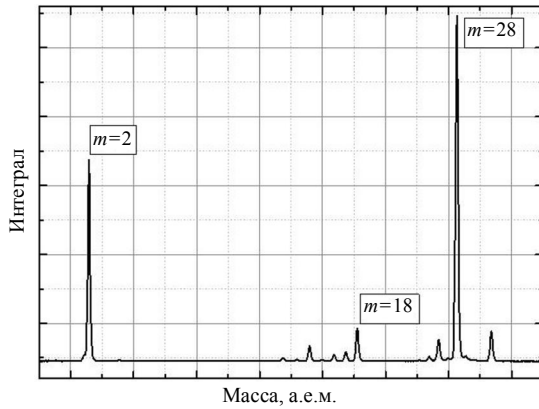


Рис. 6. Интегральный масс-спектр газа, образованного в результате ЭВП

Источником водорода могла служить влага, оставшаяся на металлических поверхностях, витонные прокладки, использовавшиеся для уплотнения, или водород, не полностью десорбировавшийся при прогреве вольфрамовой проволоочки. На основании проведенных исследований пока затруднительно однозначно указать на источник происхождения столь значительного количества водорода.

Однако достаточно уверенно можно утверждать, что 2/3 от общего количества газа образуется уже после прохождения первого полупериода тока, т. е. за счет осциллирующего разряда. Основанием для такого вывода послужили результаты серии экспериментов, проведенных с почти аperiodиче-

ским токовым импульсом. Для этой цели между кабелями, транспортирующими импульс от батареи к нагрузке, и самой проволоочкой было вставлено нелинейное от температуры сопротивление. Соответствующие осциллограммы приведены на рис. 7.

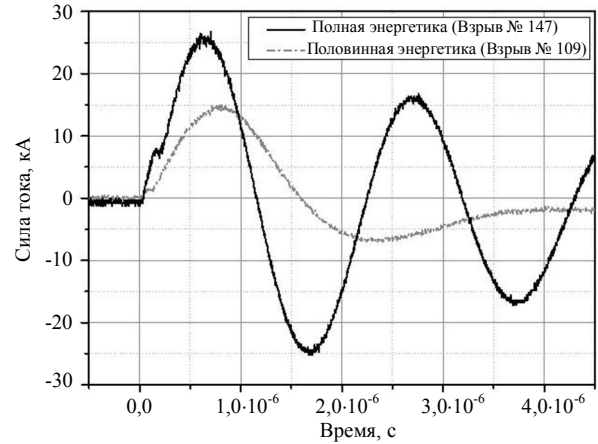


Рис. 7. Осциллограммы тока для различных декрементов затухания в разрядном контуре

При одинаковых размерах вольфрамовой проволоочки в экспериментах с низкой добротностью контура давление газа после ЭВП, усредненное по серии, составило  $P_L = 22 \pm 2$  Па, а в экспериментах с высокой добротностью контура  $P_H = 61 \pm 5$  Па. По-видимому, именно из-за осциллирующего разряда скачок давления после ЭВП почти не зависел от радиуса и длины проволоочки и не мог служить каким-либо критерием вложенной в проволоочку энергии.

В ряде экспериментов наблюдалось непостоянство скорости натекания газа во взрывную камеру от времени. На рис. 8 представлена зависимость скорости натекания газа в камеру от времени до и после электровзрыва.

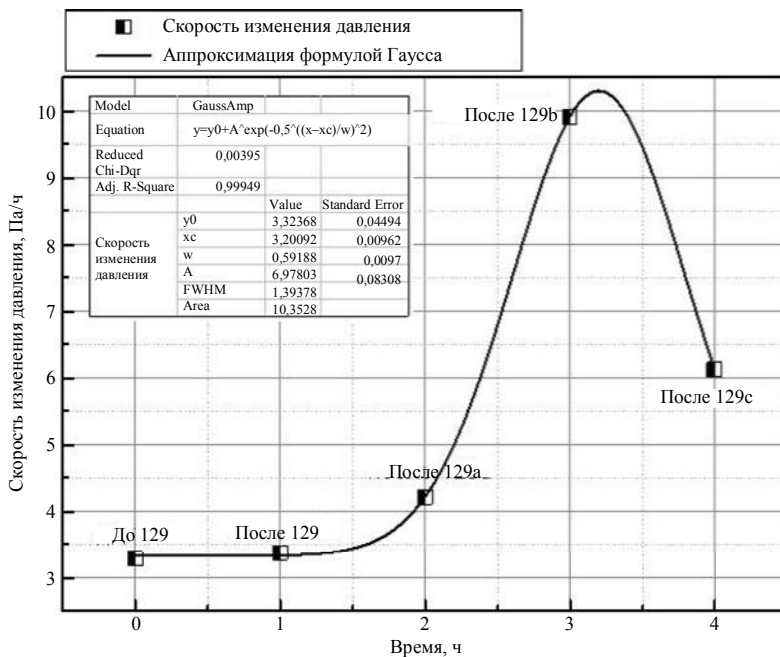


Рис. 8. Зависимость скорости натекания газа в камеру от времени

Никаких технологических операций с вакуумной частью установки в течение всего времени измерений не совершалось. Из рисунка видно, что после ЭВП скорость натекания почти не изменилась, но через 3 ч скорость натекания газа начала возрастать, а затем вернулась к начальному значению. Вариация скорости натекания может быть связана с приповерхностными процессами в кварце [26], которые были стимулированы ЭВП.

При измерении количества  $^4\text{He}$ , содержащегося во взрывной камере с помощью течеискателя MS-40, методика временного измерения общего давления оказалась также очень полезной, поскольку позволяла с хорошей точностью учитывать количество  $^4\text{He}$ , поступающего во взрывную камеру из атмосферы вместе с воздухом. Процедура измерения  $^4\text{He}$  состояла в следующем. После электровзрыва весь находящийся во взрывной камере газ скачивался через гелиевый течеискатель, который позволял подсчитать общее число атомов  $^4\text{He}$ . Затем вентиль, соединяющий течеискатель с взрывной камерой, перекрывался и в течение нескольких часов давление в камере нарастало за счет диффузии газа из стенок и натекания воздуха через уплотнения. После этого процедура скачивания через течеискатель повторялась.

Результаты измерения количества частиц  $^4\text{He}$  наносились на график, отображенный на рис. 9. Из рисунка видно, что скорость образования частиц газа  $m = 4$  а.е.м. после электровзрыва вольфрамовой проволоочки уменьшается со временем, а через время  $T \sim 70$  ч становится постоянной. Поведение кривой в первые часы после ЭВП, возможно, определяется диффузией атомов  $^4\text{He}$  из кварцевых стенок камеры. Но через 70 ч, как видно из графика, основным механизмом, определяющим поступление гелия в разрядную камеру, становится натекание гелия из атмосферы через соединительные уплотнения.

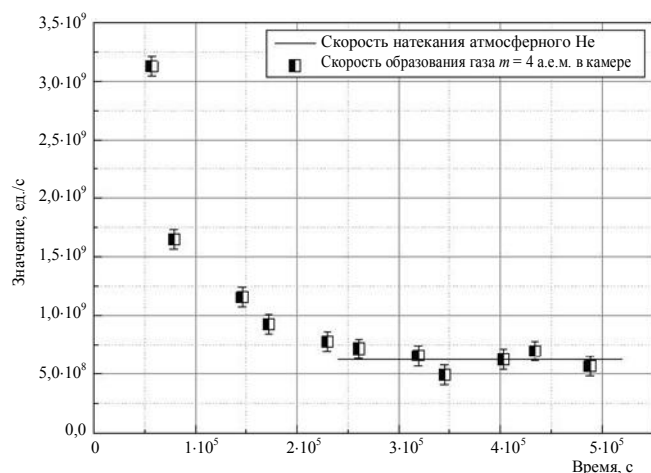


Рис. 9. Скорость появления частиц с  $m = 4$  а.е.м. в камере после ЭВП (взрыв № 54)

### Выводы

1. Разработана методика исследования газовой фазы сильноточного электрического взрыва.
  2. Обнаружена немонотонность поведения скорости натекания во времени, которая, по всей видимости, связана с диффузией газа из стенок кварца.
  3. Установлено, что количество газа, образующегося во взрывной камере, зависит от электротехнических параметров разрядного контура.
  4. Выявлено, что парциальное давление водорода в образующейся газовой смеси составляет ~40 %. Столь значительное количество водорода может быть обусловлено как водородом, содержащимся в проволоке, так и наличием паров воды и диэлектрических витонковых прокладок.
  5. Обнаружено аномальное количество частиц газа  $m = 4$  а.е.м., по всей видимости, атомов  $^4\text{He}$ . Причина аномалии окончательно не выявлена, однако на основании проведенных исследований можно утверждать, что аномалия не может быть объяснена натеканием гелия из атмосферы.
- Сопоставление результатов данной работы с результатами других исследователей показало, что методика измерения количеств частиц газа  $m = 4$  а.е.м. может служить критерием воспроизводимости электровзрыва.

Первоначально идея исследования газа, образовавшегося в результате электрического взрыва вольфрамовой проволоочки, была почерпнута из работы [20]. Но проведенные предварительные эксперименты показали, что использование разработанной методики в будущем должно способствовать углублению наших представлений о физическом механизме явления ЭВП.

Авторы данной работы считают своим долгом выразить благодарность за помощь в проведении экспериментов сотрудникам ООО "Эра-СФТИ" и ГНПО "СФТИ" Г. И. Астапенко, Д. А. Войтенко, Ю. В. Матвееву, Р. М. Ариба, А. П. Жукову; сотрудникам НИЦ "Курчатовский институт" В. И. Мижирицкому и В. Л. Столярову за активное участие и помощь в эксперименте; сотруднику ГНЦ РФ ТРИНИТИ А. Н. Старостину за высказанные им критические замечания, которые способствовали улучшению диагностик, а также благодарны Б. А. Лазба, А. И. Марколия, Л. А. Лебедеву и В. В. Фролову за финансово-организационную поддержку данной работы, которая проводилась в рамках совместного Российско-Абхазского проекта.



## Литература

1. Иваненков Г. В., Пикуз С. А., Шелковенко Т. А. и др. Препринт ФИАН. 2004. № 9. Ч. 1; № 10. Ч. 2; № 11. Ч. 3.
2. Бурцев В. А., Калинин Н. В., Лущинский А. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Мартынюк М. М. Фазовые переходы при импульсном нагреве. — М.: Издательство РУДН, 1999.
4. Ткаченко С. И., Хищенко К. В., Воробьев В. С. и др. // ТВТ. 2001. Т. 39. С. 728.
5. Волков Г. С., Грабовский Е. В., Митрофанов К. Н., Олейник Г. М. // Физика плазмы. Т. 30. № 2. С. 99.
6. Spielman R. B., Deeney C., Chandler G. A. et al. // Phys. of Plasmas. 1998. V. 5. No. 5. P. 2105.
7. Ананьев С. С., Бакиев Ю. Л., Блинов П. И. и др. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 6. С. 1.
8. Лернер М. И., Сваровская Л. В., Псахье С. Г., Бакина О. В. // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 11—12. С. 56.
9. Уруцкоев Л. И., Ликсонов В. И., Циноев В. Г. // Прикладная физика. 2000. № 4. С. 83.
10. Kuznetsov V. D., Mishinsky G. V., Penkov F. M., Arbuzov V. I., Zemenik V. I. // Ann. Fond. L. de Broglie. 2003. V. 28. No. 2. P. 173.
11. Priem D., Racineux G., Lochak G. et al. // Ann. Fond. L. de Broglie. 2008. V. 33 P. 129.
12. Segrè E., Wiegand C. E. // Phys. Rev. 1949. V. 75. No. 1. P. 39.
13. Leininger R. F., Segrè E., Wiegand C. E. // Ibid. V. 76. No. 7. P. 897.
14. Bainbridge K. T., Goldhaber M. // Ibid. 1951. V. 84. No. 6. P. 1260.
15. Jung M., Bosch F., Beckert K. et al. // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 69. No. 15. P. 2164.
16. Bosch F., Faestermann T., Friese J. et al. // Ibid. 1996. V. 77. No. 26. P. 5190.
17. Филиппов Д. В. // Ядерная физика. 2007. Т. 70. № 2. С. 280; № 12. С. 2068.
18. Erma V. A. // Phys. Rev. 1957. V. 105. P. 1784.
19. Hatting H., Hunchen K., Waffer H. // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 25. P. 941.
20. Wendt G. L., Irion C. E. // Amer. Chem. Soc. 1922. V. 44. P. 1887.
21. Anderson J. // Astrophis. J. 1920. V. 51. P. 37.
22. Rutherford E. // Nature. 1922. V. 109. P. 418.
23. Wendt G. L. // Science. 1922. V. 55. P. 567.
24. Cozzini C. et al. // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. P. 064606.
25. Аруев Н. Н., Козловский А. В., Федичкин И. Л. и др. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. С. 83.
26. Аргунова Т. С. и др. // ФТТ. 2003. Т. 45. № 10. С. 1818.

## The development of a research methodology for the gas phase of the electric explosion of conductors

*L. I. Urutskoev, D. V. Filippov, A. O. Biryukov, K. A. Alabin*  
 Moscow State University of Printing Arts,  
 2A Pryanishnikov str., Moscow, 127550, Russia  
 E-mail: urleon@yandex.ru

*A. A. Rukhadze*  
 A. M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences  
 38 Vavilova str., Moscow, 119991, Russia  
 E-mail: rukh@fpl.gpi.ru

*A. A. Markoliya*  
 Sukhum Institute of Physics and Technology  
 665 Kodorskoe highway, Sukhum, 384914, RA

*T. V. Shpakovsky, G. K. Steshenko, A. A. Levanov, P. V. Belous*  
 Moscow Institute of Physics and Technology  
 9 Institutskiy al., Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia

***The article describes methods for determining the chemical composition of the gas produced as a result of the high-current electrical explosion of tungsten wire. Described in detail methodology of measuring the amount of particles with mass  $m = 4 u$ , detected in the chamber after the electric blast. Discussed possible sources of measurement error, and results of verification experiments are shown. Presented the results of measurements of time dependences of pressure and amount of particles  $m = 4 u$ , whose behavior were quite unexpected.***

PACS: 52.80.Qj, 07.30.-t, 07.75.+h, 52.70.Nc

**Keywords:** electric explosion of wire, chemical composition of gas, helium, mass spectrometer, tungsten, gas methodology, weak nuclei.

Bibliography — 26 references.

Received March 22, 2012