

ФИЗИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Л.И. УРУЦКОЕВ¹, Д. В. ФИЛИПPOB¹, А.А. РУХАДЗЕ², В.П. БЫСТРОВ²,

Ю.П. ДОНЦОВ³

В.С.ПАРБУЗИН⁴

А.В. СТЕБЛЕВСКИЙ⁵

¹ ГНУП «РЭКОМ», РИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, РФ

³ ИОЯФ, РИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ

⁴ ХимФак МГУ, Москва, РФ

⁵ Институт общей и неорганической химии РАН им. Курнакова, Москва, РФ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ ТИТАНОВОЙ ФОЛЬГИ В ЖИДКОСТИ

Описаны эксперименты по импульсному электровзрыву тонких титановых фольг в воде при мощностях разряда ~ 0,2 ГВт. Обнаружено образование значительного количества молекулярного водорода, происхождение которого невозможно объяснить разложением воды, либо на основе известных химических реакций. Высказана гипотеза о ядерном механизме происхождения наблюдаемого молекулярного водорода при электровзрыве. Подчеркивается ряд измерений, подтверждающих высказанную гипотезу.

L.I. URUTSKOEV¹, D.V. FILIPPOV¹, A.A. RUKHADZE², V.P. BYSTROV², Y.P. DONTSOV³

V.S. PARBUZINE⁴, A.V. STEBLEVSKY⁵

¹ RECOM, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

² General Physics Institute (Russian Academy Of Sciences), Moscow, Russia

³ National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

⁴ Moscow State University Department of Chemistry, Moscow, Russia

⁵ Institute of Inorganic Chemistry, Moscow, Russia

GAS PHASE UNDER ELECTRICAL EXPLOSION OF THE TITAN FOIL IN LIQUID

Experimental studies of pulsed electric explosion of thin titanium foils in water with discharge power of ~0,2 GW are described. The production of a considerable amount of molecular hydrogen is revealed whose origin can be explained neither by water decomposition nor by known chemical reactions. A nuclear mechanism of occurrence of the observed molecular hydrogen upon electric explosion is hypothesized. Emphasis is laid on some measurements confirming the hypothesis.

Ключевые слова: электрический взрыв, водород.

Key words: electrical explosion, hydrogen.

1. Введение

Давно известно, что при сильноточном электровзрыве металлических проволочек в жидкости возникают сильные магнитные поля ($H \sim 1$ МГс) и высокие импульсные давления ($P \sim 10^5$ атм.) [1, 2].

С другой стороны, в настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что сильные внешние электромагнитные поля могут значительно изменять вероятности ядерных распадов и даже менять условия стабильности ядер [3]. Так, например, полная ионизация ^{187}Re приводит к увеличению

вероятности β -распада (за счет распада в связанное состояние электрона) [4], а полная ионизация стабильных изотопов ^{163}Dy , ^{193}Ir , ^{205}Tl делает их β^- -активными (период полураспада полностью ионизованного ^{163}Dy составил 47 ± 5 сут. [5]). Теоретически показано, что сильные магнитные поля меняют вероятности β -распадов за счет изменения конечного фазового объема рождающихся β -электронов [6].

Наличие электронов у атома увеличивает вероятность α -распада по отношению к вероятности α -распада полностью ионизованного атома. Во-первых, поле атомных электронов снижает барьер для α -частицы; и, во-вторых, при α -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 α -распада энергию α -частицы следует заменить «эффективной» энергией, которая больше реальной $E \rightarrow E + 73Z^{4/3} + 65z^{5/3}$ эВ [7]. Из-за экспоненциальной зависимости вероятности α -распада от энергии α -частицы $\ln p \propto \text{const} - \sqrt{E}^{-1}$ [8], влияние атомных электронов может быть значительно. Как и следовало ожидать, атомные электроны сильнее влияют на процессы, идущие с малыми энергиями. Например, для ^{147}Sm (энергия α -частиц $\sim 2,31$ МэВ; $T_{1/2} = 7 \times 10^{11}$ лет) наличие электронной оболочки увеличивает вероятность α -распада в 2,6 раза по сравнению с ядром полностью ионизованного атома [7].

Влияние сверхсильного магнитного поля на вероятность α -распада качественно можно описать следующим образом. Внешнее сверхсильное магнитное поле меняет энергию электронной оболочки атома [9] и, следовательно, энергию любого ядерного распада, т.к. энергия распада равна разнице полных энергий начальной и конечной систем с учетом энергий ионизации атомов или ионов [3]. Для α -распада наличие внешнего сверхсильного магнитного поля приводит к увеличению энергии распада и, следовательно, к увеличению вероятности α -распада. Кроме того, внешнее магнитное поле меняет геометрию задачи: вместо сферической симметрии появляется выделенное направление вдоль магнитного поля. Это влияние неоднозначно, зависит от магнитных моментов начального и конечного состояния распадающегося ядра и в общем случае может иметь разный знак в зависимости от напряженности магнитного поля.

В связи с этим, в предыдущих исследованиях нами изучался электровзрыв металлических фольг в солях урана [10, 11] с целью экспериментального обнаружения влияния ионизации и сильного магнитного поля на изменение периодов β -распадов. В ходе этих экспериментов нами исследовалась газовая фаза электровзрыва (т.е. те газы, которые образуются в результате электровзрыва) на предмет обнаружения He. При анализе газовой смеси, в ней было обнаружено аномально высокое содержание водорода. Тщательное изучение этого феномена потребовало проведения более чем 500 опытов и заняло около четырех лет. Результаты этих исследований кратко изложены в настоящей статье.

2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состояла из двух конденсаторных батарей емкостью $C = 2,5 \times 10^{-3}$ Ф каждая. Одна батарея заряжалась до напряжения +4,8 кВ, а вторая до -4,8 кВ относительно потенциала «земли». Энергозапас установки при максимальном напряжении составлял $W \sim 50$ кДж. В качестве коммутаторов для батарей использовались два твердотельных вакуумных разрядника тригатронного типа, которые поджигались специально разработанными блоками поджига. Время импульса тока от каждой батареи составляло $T \sim 120$ мкс, а его величина $I_0 \sim 120$ кА. Ток измерялся с помощью коаксиальных шунтов, а напряжение с помощью делителя, подробно описанных в [10, 11], где также приведены осциллограммы тока и напряжения. В качестве регистраторов электрических сигналов использовались аналоговые осциллографы и быстродействующие аналогово-цифровые преобразователи, совмещенные с компьютером. Разброс по времени срабатывания разрядников τ составлял, как правило, не более $\tau = \pm 30 \times 10^{-6}$ с. Транспортировка электрического импульса от каждой батареи осуществлялась с помощью четырех коаксиальных кабелей (величина тока составляла $I \sim 30$ кА через один кабель, что позволяло долгое время сохранять механическую прочность кабеля), индуктивность которых составляла $L = 0,4$ мкГн. Таким образом, в принципе, установка могла срабатывать на восемь независимых электрических нагрузок одновременно. Регистрирующая аппаратура располагалась в экранированной комнате на расстоянии ~ 40 м, что позволяло избегать электромагнитных наводок.

В описываемой серии экспериментов, каждая батарея срабатывала на собственную электрическую нагрузку, которой служила титановая фольга I

(рис. 1), приваренная к массивному титановому электроду 2 с помощью контактной электросварки. На рис. 1 схематически представлена одна из двух взрывных камер. Между массивным электродом и фольгой был установлен изолятор из тефлона 3 и, таким образом, приваренная фольга играла роль оплетки кабеля соединенной «накоротко» с центральной жилой «кабеля». Электроды крепились на диэлектрическом изоляторе 4, как показано на рисунке. В зависимости от цели эксперимента, изолятор изготавливался из полиэтилена или тефлона. Одновременно изолятор служил уплотняющим элементом конструкции взрывной камеры. Масса титановой фольги (нагрузки) варьировалась в разных опытах от одной до четырех полосок, каждая из которых была толщиной $\Delta=50$ мкм, шириной 1 см и длиной $L=4,0$ см. Масса каждой полоски составляла $m=(90\pm 5)\times 10^{-3}$ г.

Внутренность взрывной камеры 5 была изготовлена из полиэтилена (или тефлона) и помещалась в нижней части прочного корпуса, сделанного из нержавеющей стали 6, который позволял обеспечить герметичность во всех опытах. Все остальные уплотняющие элементы, обеспечивающие герметичность, были изготовлены из неводородосодержащих материалов. Герметичность самой взрывной камеры обеспечивалась, за счет

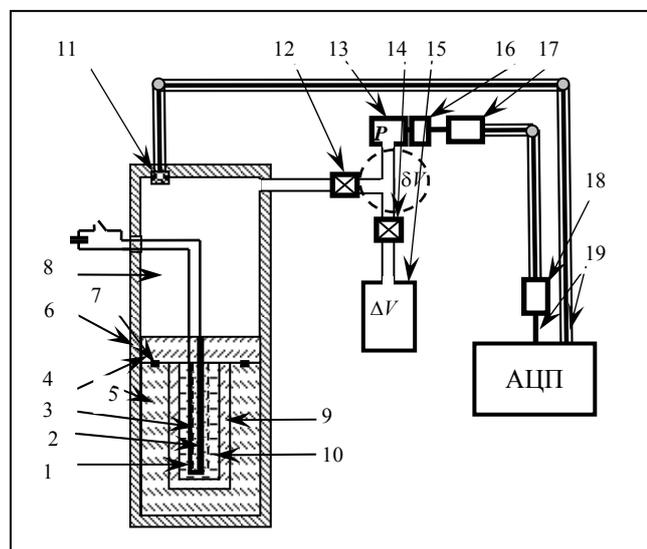


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – титановая фольга; 2 – титановый электрод; 3 – изолятор; 4 – крышка; 5 – внутренность взрывной камеры; 6 – корпус из нержавеющей стали; 7 – уплотнения; 8 – газосборная камера; 9 – одноразовый стакан; 10 – жидкость; 11 – пьезоэлектрический датчик общего давления; 12 – вентиль; 13 – полярографический датчик парциального давления водорода ДВ-16; 14 – вентиль; 15 – тарированный газосборный баллон; 16 – усилитель сигнала; 17 – преобразователь сигнала напряжения–частота; 18 – преобразователь сигнала частота–напряжение; 19 – кабель.

уплотнения 7 крышки 4. Через верхнюю часть металлического контейнера осуществлялся подвод напряжения. Одновременно он играл роль газосборной камеры 8 объемом $V=3,125$ л. Во внутренности взрывной камеры 5 располагался одноразовый стакан 9 изготовленный из тефлона (или полиэтилена), в который заливалась жидкость 10 и погружался центральный электрод с приваренной к нему фольгой. В момент электровзрыва стакан 9 подвергался наибольшей механической деформации, а в тех опытах, когда он был изготовлен из тефлона, то и просто механическому разрушению. Поэтому применение этого конструкционного элемента, заметно продлевало срок службы основной части взрывной камеры 5. Объем заливаемой жидкости, в основной части описываемых экспериментов, составлял $v\sim 18$ см³. Жидкостью служили – либо деионизированный бидистиллят (H₂O), либо сертифицированная 99,8 % тяжелая вода (D₂O). В момент электровзрыва давление во взрывной камере резко возрастало и образовавшийся газ через уплотнение 7 прорывался в газосборную камеру 8.

Необходимость наличия газосборной камеры продиктована, тем обстоятельством, что попытки удержать газы во взрывной камере не приводили к положительному результату, а лишь к механическому разрушению взрывной камеры.

В верхней части газосборной камеры находился датчик давления 11 и патрубок, который через вентиль 12 соединялся с датчиком измерения парциального давления водорода 13 и через вентиль 14 с тарированным газосборным баллоном 15 объемом $\Delta V=250$ см³, назначение которого будет обсуждено далее. Перед установкой на газосборную камеру, газосборный баллон откачивался до давления 2×10^{-2} Торр. А сама газосборная камера, перед электровзрывом, откачивалась до давления нескольких Торр, несколько раз продувалась аргоном, после чего заполнялась аргоном высокой чистоты до давления $P=1,5$ атм. Такая процедура позволяла свести к минимуму влияние атмосферных газов на результаты последующих измерений.

3. Описание методик измерений

В настоящем исследовании использовались как стандартные методики (твердотельная лазерная масс-спектрометрия, газовая хроматография, газовая масс-спектрометрия, электронный микроскоп), так и методики, специально разработанные для этого эксперимента (измерение относительного содержания водорода, оптическая и методика создания калибровочных смесей HD газов).

3.1. Методика измерений парциального давления водорода

Поскольку результаты измерений количества образовавшегося водорода являются весьма важными для настоящего исследования, то эта методика будет описана подробнее всего. Методика состояла из следующих средств измерений: датчика парциального давления водорода, датчика общего давления, блока электроники, аналого-цифрового преобразователя и компьютера. В качестве датчика парциального давления водорода использовался полярографический датчик ДВ-16 (изготовитель ЗАО «Инсофт», Санкт-Петербург) [12]. Принцип работы датчика основан на линейной зависимости величины диффузного тока, протекающего в полярографической ячейке, от парциального давления водорода, растворенного в электролите. В ходе тестирования нами было установлено, что функция отклика датчика зависит от двух параметров – парциального давления водорода P_H и общего давления в смеси P_0 . Следует отметить, что в диапазоне давлений $1 \text{ атм.} < P_0 < 2,5 \text{ атм.}$, зависимость $U_{PH} = f(P_0)$ не является сильной, однако для повышения точности измерений потребовалось применение специальной калибровочной процедуры.

Условия проведения эксперимента требовали передачи информации об измеряемом параметре на значительное расстояние (более 30 м), что приводило к наложению сигнала помехи на полезный сигнал. Кроме того, в момент электровзрыва весьма вероятно попадание разрядов высокого напряжения на электрические цепи датчика водорода, что, в случае использования гальванической связи по постоянному току, может приводить к выходу из строя всей измерительной системы. Проблема была решена за счет преобразования измеряемого напряжения в частоту. Такой способ позволяет передавать сигнал на большие расстояния без риска искажения полезной информации помехами, наводками и другими изменениями амплитуды сигнала. Этот вариант, также, позволил сделать гальваническую развязку измерительной цепи за счет наиболее просто реализуемой, емкостной связи. Блок обратного преобразования частоты в напряжение располагался в непосредственной близости от цифрующего устройства. Погрешность, возникшая из-за нелинейности преобразования сигнала датчика из напряжения в частоту, составила $\pm 0,03 \%$, погрешность обратного преобразования из частоты в напряжение составляла $\pm 0,06 \%$, что намного меньше, чем основная погрешность датчика водорода: $\pm 1,5 \%$.

Для измерения общего давления смеси газов в камере использовался пьезоэлектрический датчик SIEMENS SITRANS P Serie Z, Тур 7MF1564. Электрический сигнал U_{P0} от датчика выводился непосредственно на АЦП. Линейность датчика вместе со всем трактом была проверена с помощью образцового манометра. Результат калибровки показал, что измерительная система линейна в хорошем приближении с точностью $\sim 0,1 \%$, что даже выше, чем гарантировалось производителем.

После электровзрыва фольги в газосборной камере возникло давление $P_0 \sim 2 \text{ атм.}$, которое контролировалось датчиком давления 11 (рис. 1). Вентиль 12 в момент «выстрела» перекрывался, что связано с эксплуатационными характеристиками датчика водорода, который терял работоспособность, как при резком скачке давления, так и при форвакуумной откачке. Вентиль 14 также перекрывался и отсекал от рабочего объема камеры тарированный баллон 15. Необходимость использования в данной методике тарированного баллона 15 вызвана невозможностью откачки воздуха из конструктивного «балластного» объема $\delta V \sim 18 \text{ см}^3$, возникающего между вентилями 12, 14 и датчиком давления 13 (см. рис. 1). Таким образом, балластный объем δV оказывался занятым воздухом при атмосферном давлении. После открытия вентиля 12, и таким образом соединения объема δV с основным объемом, парциальное давление газов начинало медленно выравниваться, из-за невысокой скорости процесса диффузии через мембрану. Это обстоятельство приводило к значительному времени установления равновесия между газом из измеряемого объема V_0 и датчиком водорода. Что, в свою очередь, требовало большой затраты времени на одно измерение.

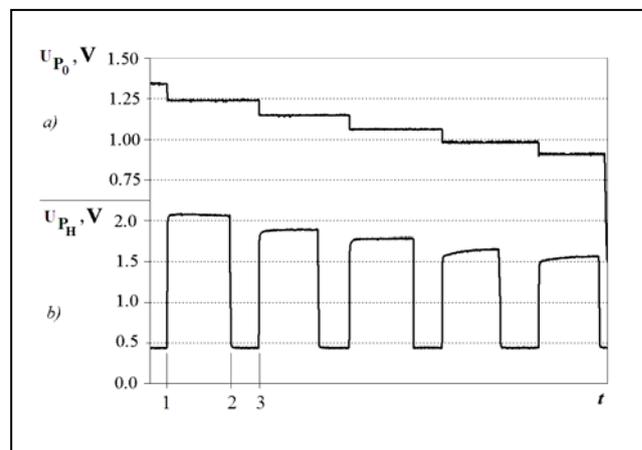


Рис. 2. Сигналы с датчиков давления а) и давления водорода б): 1 – момент открытия вентиля 14 (рис. 1); 1–2 – время измерения; 2 – момента закрытия вентиля 12 и отсоединения баллона 15 и датчика 13; 2–3 – продувка и откачка баллона.

Измерительная процедура состояла в следующем. Для уменьшения времени выхода датчика давления водорода на стационарный режим измерений, открывался вентиль *14* и газ «продавливался» в объем ΔV . При такой процедуре измерения время выхода датчика парциального давления водорода на стационарный режим составляло всего ~30 мин. На рисунке 2 представлены сигналы с датчика давления *a* и датчика водорода *b*, регистрируемые АЦП во время измерения. Из рисунка видно, что в момент открытия крана *14*, на датчике *13* виден резкий скачок вверх (шаг 1, на рис. 2*b*). Датчик общего давления *11* в этот момент показывает скачок в сторону уменьшения давления (рис. 2*a*).

Далее кран к датчику давления водорода перекрывается (шаг 2 на рис. 2), снимается калибровочный баллон и датчик водорода. Калибровочный баллон снова откачивается до вакуума 10^{-2} Торр, и процедура измерения парциального давления повторяется несколько раз.

Считая процесс изотермическим, легко выписать следующие соотношения, связывающие давления i и $i + 1$ шага итерации:

$$P_0^i = P_0^{i+1} \left(\frac{V_0 + \Delta V}{V_0} \right) + \frac{\delta V}{V_0} (P_0^{i+1} - P_a),$$

$$P_H^i = P_H^{i+1} \left(\frac{V_0 + \Delta V + \delta V}{V_0} \right),$$
(1)

где P – давление в атмосферах; $P_a=1$ атм – атмосферное давление.

Поскольку относительное содержание водорода на любом шаге зависит от исходного относительного содержания водорода γ^0 и известных объемов:

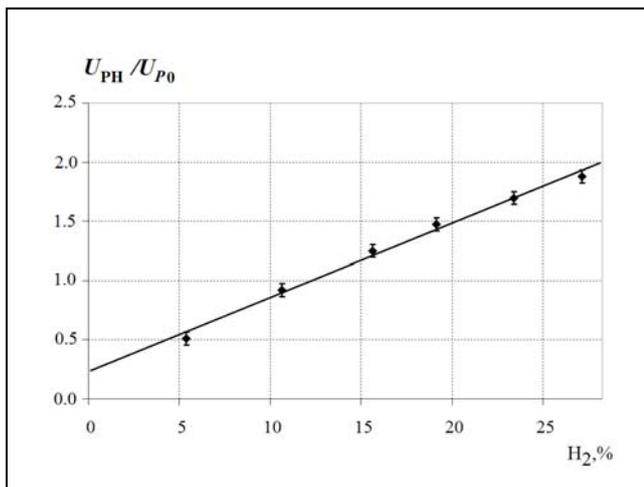


Рис. 3. Результаты калибровки методики

$$\gamma^{i+1} = \frac{P_H^{i+1}}{P_0^{i+1}} = \gamma^i \left(1 + \frac{P_a \delta V}{P_0^i V_0} \right)^{-1},$$
(2)

то мы получаем n измерений одной и той же величины γ^0 . Преимущество такого метода состоит в уменьшении, за счет усреднения, ошибки измерения, возникающей за счет слабой зависимости показаний датчика парциального давления водорода от общего давления смеси газов P_0 . Если пренебречь параметром $\delta V/V_0 \sim 0,6\% \ll 1$, то $\gamma^i = \gamma^0$ и формулы для расчетов заметно упрощаются. Для того чтобы убедиться в работоспособности методики и оценить точность измерений, была составлена калибровочная смесь (83 % Ag + 17 % H₂). Ошибка в измерении концентрации водорода, описанной методикой, составила менее процента.

Для проверки линейности методики в интересующем нас диапазоне концентраций, были изготовлены смеси (Ag + H₂) различных концентраций. Состав калибровочных смесей контролировался с помощью газового хроматографа.

На рисунке 3 представлены результаты калибровки методики для газовых смесей с различным относительным содержанием водорода. По оси абсцисс отложено процентное содержание водорода в смеси, а по оси ординат – усредненное по шагам безразмерное соотношение $\langle U_{PH} \rangle / \langle U_{P0} \rangle$. Из рисунка видно, что в диапазоне $5\% < \gamma < 30\%$ функция отклика линейна, в зависимости от γ .

Разработанная методика позволяла также измерять медленные изменения относительного содержания водорода в течении нескольких суток. Методика не чувствительна к замене H₂ на D₂ или HD.

С помощью описанной методики, с высокой точностью, измерялся объем газосборной камеры, знание которого требовалось для правильного расчета абсолютных количеств образующихся в результате электровзрыва газов.

3.2 Методика хроматографического анализа

Методика газовой хроматографии использовалась, с одной стороны как контроль описанной ранее методики, для определения удельного содержания водорода в исследуемой смеси газов, а с другой, для качественного и количественного анализа исследуемой смеси газов. Мы использовали газовый хроматограф ЛХМ-80, в состав которого входили три сорбционные колонки. Анализ проводился при температуре 40 °С в изотермическом режиме. С помощью системы пробоотбора (баллон 15 рис. 1) газовые продукты процесса отбирались в пластиковые пакеты. Проба

газа при атмосферном давлении вводилась в каждую колонку отдельно либо газовым шприцом, либо с помощью крана-дозатора. Объем вводимой пробы составлял 0,5...1 мл. Анализируемые компоненты смеси регистрировались детектором, работа которого основывалась на измерении теплопроводности отдельных компонент газовой смеси. Количественный состав газовой смеси рассчитывался методом абсолютной калибровки по площадям хроматографических пиков (для газовых компонентов CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO_2).

Для калибровки по водороду, азоту и CO , нами использовались стандартные газовые смеси. Калибровка проводилась в день прописывания газовых проб эксперимента, либо использовалась калибровка предыдущего анализа. Поскольку измеряемые величины концентраций водорода, азота и монооксида углерода находились в диапазоне концентраций калибровочных газовых смесей, то для вычисления концентрации определяемого компонента использовалась линейная интерполяция по высоте. Методика не позволяла измерять изотопное распределение водородов.

3.3. Методика твердотельной лазерной масс-спектрометрии

В настоящем исследовании лазерная масс-спектрометрия использовалась исключительно с целью определения степени окисления порошка титана, образующегося из фольги в результате электровзрыва. Эта информация была необходима для правильного учета количества кислорода поглощенного титаном. Иными словами задача этой методики состояла в том, чтобы определить какова величина n в формуле TiO_n для каждого опыта. Помимо этого нас интересовало изотопное распределение титана содержащегося в порошке. Поэтому в качестве метода определения элементного и изотопного составов жидкости и остатков металлической фольги была выбрана лазерная масс-спектрометрия, которая при достаточной чувствительности (10^{-4} ... 10^{-5} атм. %) дает ошибку в определении количества микропримесей на уровне 10...15 %.

Методика основывалась на приборе «ЭМАЛ-2», который является лазерным масс-спектрометром и предназначен для элементного анализа твердых образцов. Мы использовали этот прибор в наших предыдущих исследованиях на протяжении многих лет и достаточно подробно описали

эту методику в ранее опубликованных работах [10, 11, 13]. На протяжении этих лет мы многократно тестировали получаемые ею результаты с помощью масс-спектрометров других типов и никогда не обнаруживали заметных противоречий. Поэтому это единственная методика в этом исследовании, которая не имела дублирующей методики. И, тем не менее, достоверность измерений регулярно проверялась по стандартным образцам сплавов, а также сертифицированным геологическим образцам.

3.4. Методика газовой масс-спектрометрии

Методика газовой масс-спектрометрии также играла в исследовании двойную роль. С одной стороны она дублировала измерения газового хроматографа и поэтому исследуемый газ, из тех же самых съемных баллонов, исследовался с помощью газового масс-спектрометра. А с другой стороны, эта методика была очень важна для определения изотопного распределения атомов водорода, в образовавшейся после электровзрыва смеси газов, в тех опытах, где в качестве жидкости мы использовали «тяжелую воду».

Основу методики составлял времяпролетный квадрупольный монополярный масс-спектрометр ММС-1А, более подробно описанный в [13], который позволял определять компоненты в пределах атомных масс от 1 до 400. Исследование элементного состава газовых проб методом масс-спектрометрии проводилось на испытательном сверхвысоковакуумной стенде в динамическом режиме. Исходное давление в испытательном объеме достигалось путем его прогрева под откачкой и составлял не более 10^{-8} Торр. Исследуемый газ, с помощью натекателя, напускался в испытательный объем в режиме дросселирования, до давления 4×10^{-6} Торр.

Тестирование, проведенное с помощью эталонных смесей газов, показало, что методика обладает не хуже чем 5 % ошибкой измерений, во всем интересующем нас диапазоне масс. В ряде случаев, для проверки правильности измерения отношений между 2-ой, 3-ей и 4-ой массами (H_2 , HD, D_2) мы использовали газовый масс-спектрометр с магнитной фокусировкой. Результаты находились в удовлетворительном согласии между собой. Наличие масс более 44-й (CO_2), в исследуемых газовых пробах с точностью до 5 %, не наблюдалось.

3.5. Методика спектрального анализа

Методика оптической спектроскопии была выбрана нами как дублирующая, для выполнения качественного элементного и полуколичественного изотопного анализа водорода. Для ее реализации была создана специальная установка, схематично показанная на рис. 4. Эта установка позволяла получать оптический спектр свечения исследуемого газа, который создавался в газовом потоке с помощью высокочастотного разряда. Спектр исследовался через кварцевую разрядную трубку, которая соединялась со стеклянной частью вакуумной установки, с помощью специально сделанного переходника кварц-стекло. Металлические детали соединялись с установкой переходами ковар-стекло. Во избежание «загрязнения» исследуемого оптического спектра «примесным» водородом, уплотнения из вакуумной резины использовались только в узле присоединения баллонов с исследуемыми газами к аналитической системе и в соединении установки с форвакуумным насосом.

Описанная конструкция аналитической установки характерна тем, что наиболее вероятные источники газообразных загрязнений (резина, вакуумные смазки в кранах) удалены достаточно далеко от зоны разряда 1 (рис. 4). Достижению этой же цели способствовали установленные до и после области разряда ловушки с жидким азотом 2, которые вымораживали пары водородосодержащих жидкостей. Эти жидкости обычно содержатся в масле форвакуумного насоса, смазке вакуумных кранов и могут попасть в газовый баллон при заборе газового образца из экспериментальной установки. Для того чтобы избежать накопления примесей в зоне высокочастотного разряда,

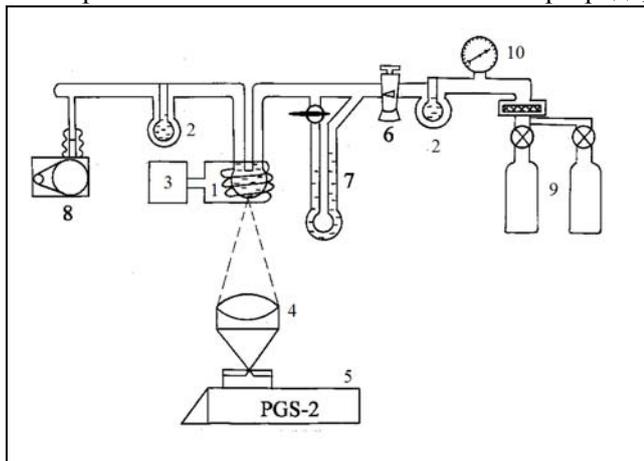


Рис. 4. Схема оптической установки: 1 – кварцевый объем; 2 – азотная ловушка; 3 – высоко-частотный генератор; 4 – линза; 5 – спектрограф; 6 – кран-напекатель; 7 – масляный манометр; 8 – форвакуумный насос; 9 – исследуемые баллоны; 10 – манометр (стрелочный).

которые могли возникать из-за возможных микро-трещин и дегазации стекла, последний осуществлялся в потоке анализируемого газа. Максимальное давление остаточного газа в объеме установки составляло около 10^{-3} Торр, тогда как давление в потоке газа во время разряда составляло ~3,0 Торр. Как будет видно из дальнейшего изложения, предпринятых мер оказалось достаточно, чтобы избежать загрязнения исследуемого газа посторонними примесями.

Исследуемый газ возбуждался в кварцевой трубке 1 (см. рис. 4), с помощью высокочастотного генератора Теслы 3. Возникавшее оптическое излучение собиралось кварцевым объективом 4 и фокусировалось в масштабе 1:1 на щель 5 спектрографа с дифракционной решеткой (PGS-2). В исследуемой области спектра дисперсия прибора составляет $7,3 \text{ \AA}/\text{мм}$. Область спектра от $3\,000 \text{ \AA}$ до $5\,000 \text{ \AA}$ фотографировалась на флюорографическую пленку РФ-3 чувствительностью 1 300 ед., а в области от $5\,000 \text{ \AA}$ до $7\,000 \text{ \AA}$ – на аэропленку чувствительностью 1 800 ед. ГОСТ.

Как уже упоминалось ранее, основной задачей, поставленной перед оптической спектральной методикой, являлось относительное измерение концентрации атомов Н и D в составе газовой смеси. И с этой задачей оптическая методика хорошо справлялась, но помимо этого, с помощью этой методики было получено много совершенно неожиданных результатов. Но их подробное изложение заняло бы слишком много места и увело бы внимание читателя от основных фактов, излагаемых в настоящей статье.

4. Экспериментальные результаты

4.1. Основные результаты

Как уже отмечалось ранее, в момент электро-взрыва фольги образуется ионизованный газ, который через уплотнения прорывается из взрывной камеры в фор - камеру. При постоянных параметрах эксперимента (а именно: масса нагрузки, тип фольги, геометрия взрывной камеры, тип жидкости, величина тока и т.д.) скачок давления происходит на одну и ту же величину. Например, для массы нагрузки из Ti ($m_{Ti}=180 \text{ мг}$), скачок давления составлял $\Delta P=0,42\pm 0,04 \text{ атм}$. Что в пересчете на объем камеры составляет $\Delta N=3,4\times 10^{22}$ атомов. Первоначально такой результат может показаться вполне естественным, поскольку всем известно, что при протекании электрического заряда через воду должны образовываться водород и кислород. Но необходимо учесть, что электрический заряд,

запасенный в конденсаторной батарее, составлял $Q \sim 11$ Кл, а число Фарадея составляет $F \sim 96\,500$ Кл/моль.

Следует отметить, что воспроизводимость эффекта в этих экспериментах зависит от многих факторов, которые, на первый взгляд, могут показаться незначительными. Однако чтобы добиться удовлетворительной воспроизводимости результатов, нам пришлось потратить около двух лет.

Как уже упоминалось ранее, в момент срабатывания конденсаторной батареи регистрировались величины токов и напряжений на электрической нагрузке, а также сигналы с пьезоэлектрического датчика давления. Сигнал с датчика давления разветвлялся согласованным образом и оцифровывался с помощью двух различных АЦП. Частота оцифровки сигнала первого («быстрого») АЦП составляла $\nu = 0,2$ МГц, а второго («медленного») – $\nu = 10$ Гц. Типичные сигналы с обоих АЦП представлены на рис. 5. Каждый из сигналов хорошо аппроксимируется двумя экспонентами:

$$P(t) = y_0 + A_1 \exp\left(-\frac{t-t_0}{t_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t-t_0}{t_2}\right). \quad (3)$$

Значения t_1 и t_2 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характерные времена изменения давления, с

АЦП-1 (МГц)	АЦП-2 (Гц)
	0,04
$0,366 \pm 0,004$	$0,379 \pm 0,003$
3,8	

Характерные периоды экспонент для первого сигнала составляют $T_1 \sim 40$ мс, $T_2 \sim 0,3$ с, а для второго – $T_2 \sim 0,3$ с и $T_3 \sim 3,2$ с. Таким образом, видно, что поведение давления во времени характеризуется

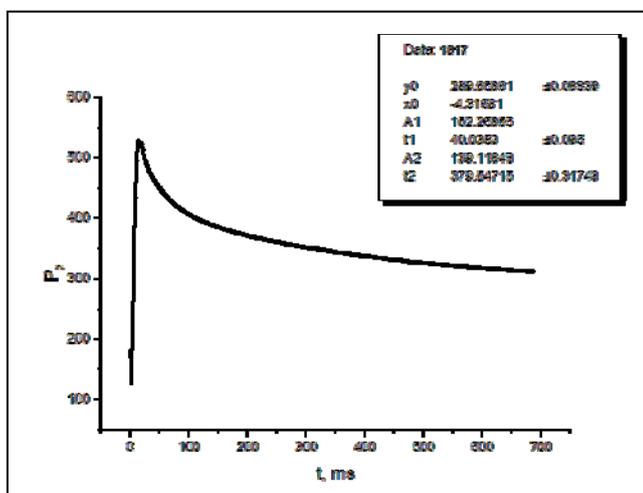


Рис. 5а. Сигнал с быстрого АЦП

тремя временными масштабами. Тщательного исследования этого вопроса в рамках данной работы не проводилось, но можно предположить, что первый период экспоненты $T_1 \sim 40$ мс обусловлен радиационным охлаждением; второй $T_2 \sim 0,3$ с – переходными газодинамическими процессами, а третий период в 3,2 с – теплопроводностью. Скорость нарастания и амплитуда сигнала на рис. 5а позволяла, хотя и весьма косвенно, судить об интенсивности процесса наработки газа. А сигнал с медленного АЦП (рис. 5б) позволял контролировать сохранение герметичности камеры после «выстрела», а также процедуру измерения парциального давления водорода (см. рис. 2б). На рис. 5б видно, что через 20...30 с после электрического импульса все переходные процессы в основном заканчиваются и давление выходит на стационарное значение.

На начальной стадии настоящего исследования основные усилия направлялись на изучение химического состава газа, образовавшегося в результате электровзрыва титановой фольги. Обычно, через несколько минут после электровзрыва, т.е. когда давление и температура в газосборной камере уже выходили на свои стационарные значения, по методике, описанной ранее, измерялось парциальное давление водорода, в образовавшейся смеси газов. Далее в тарированный баллончик отбиралась газовая проба и исследовалась с помощью газового хроматографа. В таблице 2 представлен типичный результат измерений одной из проб, полученный с помощью газового хроматографа. Из приведенной таблицы видно, что основным компонентом, исключая балластный газ аргон, является водород. Обращает на себя внимание факт отсутствия кислорода, в пределах превышающих чувствительность методики.

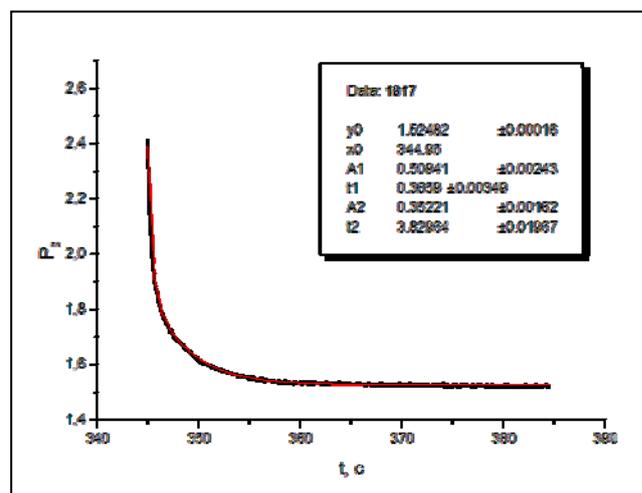


Рис. 5б. Сигнал с медленного АЦП

Таблица 2

*Типичный результат измерений
газового хроматографа*

Элемент	%
H ₂	13,97
O ₂	<0,3
N ₂	0,6
CO	3,62
Ar	80,85
CO ₂	0,4
CH ₄	<0,02
C ₂ H ₆	<0,03
C ₂ H ₄	<0,04
C ₃ H ₈ , C ₃ H ₆	<0,1
C ₂ H ₂	<0,07
Σ	100

В таблице 3 приведено сравнение результатов измерений относительного содержания H₂ в газовой смеси, полученных помощью газового хроматографа и поляризационного датчика, для одной из серий экспериментов. В этой серии экспериментов, в качестве буферного газа, также использовался Ar. Следует отметить, что химическая «чистота» буферного аргона составляла 99,8 %. Из таблицы 3 видно хорошее совпадение результатов, полученное с помощью двух различных методик. И, тем не менее, чтобы убедиться в том, что газовый хроматограф дает правильный химический состав смеси, часть газовых проб параллельно исследовалась с помощью газового масс-

спектрометра. На рисунке 6 представлены результаты анализа одной из проб, полученные с помощью газового масс-спектрометра рис. 6а и газового хроматографа рис. 6б для случая, когда в качестве буферного газа использовался N₂ высокой химической чистоты. Из рисунка 6 видно, что наблюдается хорошее качественное совпадение между двумя методиками. Из рисунка 6а видно, что газовый масс-спектрометр также показывает (в пределах чувствительности методики) отсутствие свободного кислорода.

Из факта совпадения результатов измерений проведенных с помощью различных методик следует, что аномально большое количество водорода и отсутствие кислорода не являются результатом ошибочных измерений. Простой пересчет относительного содержания водорода с учетом объема камеры и величины общего давления показывает, что в каждой из двух камер за время импульса генерируется по ~0,9 л водорода (при нормальных условиях). И этот результат является достаточно устойчивым, надежным и проверенным в большом количестве экспериментов. Таким образом, если предположить, что регистрируемый водород образовался в результате разложения (химического или пиролитического) воды, то возникает вопрос: куда исчез кислород? Иными словами 0,9 л атомарного кислорода, образовавшегося в результате разложения воды, должно было бы адсорбироваться поверхностью камеры, не образовав при этом заметного количества молекулярного

Таблица 3

Результаты измерений относительного содержания водорода, измеренного с помощью газового хроматографа и поляризационного датчика для серии экспериментов с нагрузкой $m_{Ti}=180$ мг

№	1 830	1 829	1 828	1 826	1 825	1 824	1 823	1 822	Среднее			
Поляроргр.	15,76	16,89	14,2	14,0	17,9	19,5	16,8	13,4	14,4	15,6	18,5	16,1±2
Газ. хром.	17,4	15,4	16,4	14,1	18,5	16,8	16,4	12,8	13,7	14,5	18,0	15,8±1,8

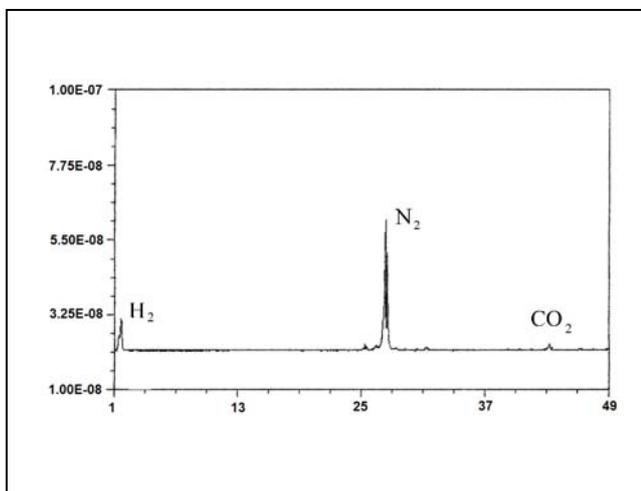


Рис. 6а. Газовый масс-спектр

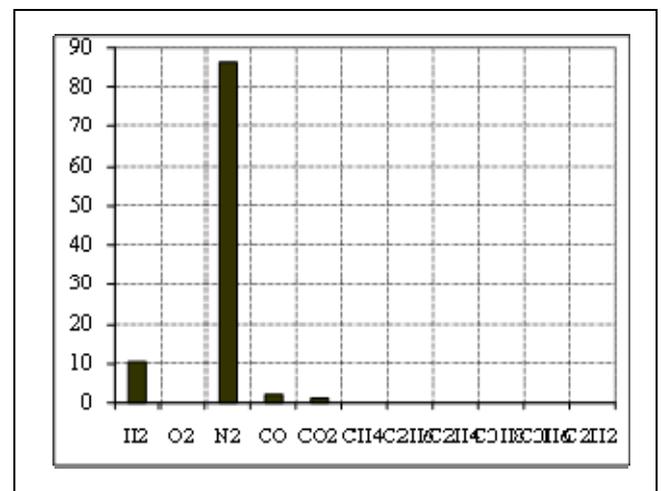


Рис. 6б. Газовая хроматография

кислорода. И как следует из рисунка 5b, этот механизм должен «сработать» в течении первых секунд, поскольку затем падение давления прекращается.

4.2. Анализ химического механизма образования водорода

Чтобы попытаться разобраться в физическом механизме образования водорода, было необходимо навести баланс по кислороду. Незначительная часть кислорода обнаружилась в газовой пробе в виде CO и CO₂ и это количество кислорода было легко учесть в общем балансе. Причиной отсутствия свободного кислорода могло служить окисление титанового электрода и взрывающейся фольги. Ни изоляция титанового электрода от воды с помощью тефлона, ни замена в эксперименте электродов из Ti на электроды, изготовленные из металлов, обладающих меньшей способностью к окислению (нержавеющая сталь, кобальт и т.д.), не приводили к наблюдению кислорода в образующемся газе.

Что касается окисления титановой фольги, то этот канал связывания кислорода учитывался с помощью методики твердотельной масс-спектрометрии. С этой целью исследовались остатки фольги, и измерялось соотношение Ti/O. В результате многочисленных измерений было установлено, что титан окисляется до формулы TiO_n (где $n=1,4\pm 0,2$). Это означает, что часть Ti окисляется до TiO₂, а часть до TiO. Следует отметить, что степень окисления титана зависит от массы используемой нагрузки, и это обстоятельство также учитывалось в общем балансе по кислороду.

Например, при массе нагрузки $m=180$ мг из одного грамм-моля H₂O при электровзрыве образуется $(2,3\pm 0,16)\times 10^{22}$ молекул H₂. Количество атомов кислорода, обнаруживаемое в газовых пробах в виде CO и CO₂ составляет $N_O=(8,7\pm 0,9)\times 10^{21}$. Происхождение этих молекул вполне можно объяснить пиролизическим разложением молекул воды с последующим образованием оксидов углерода за счет соединения атомов кислорода с углеродом, например, содержащимся в полиэтилене. Титановая фольга, за счет окисления, связывает $N_O=(3,3\pm 0,6)\times 10^{21}$ атомов. Таким образом, баланс по кислороду не сходится почти наполовину, т.е. почти для 0,5 л водорода не обнаруживается соответствующих атомов кислорода.

Нами была исследована зависимость выхода водорода от массы титановой фольги. Для каждой массы фольги была проведена серия не менее чем из семи опытов и усредненные результаты приве-

дены на рисунке 7. Треугольные точки относятся к общему количеству зарегистрированного водорода, а круглые к водороду нехимического происхождения. Там, где не проставлена величина стандартного отклонения, она меньше размеров точки. Учитывая тот факт, что мы имеем дело с импульсным плазменным процессом, воспроизводимость опытов можно считать удовлетворительной. Из рисунка 7 видно, что количество водорода, имеющего нехимическое происхождение, практически не зависит от массы использованной титановой фольги. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что при усреднении величина стандартного отклонения для нижних точек получилась меньше, чем для исходных измерений общего количества водорода (верхних точек). Более того, количество молекул водорода, образующихся за счет не химического механизма, с хорошей точностью равно $N=10^{22}$ вне зависимости от массы фольги. Иными словами, этот механизм носит более воспроизводимый и, если так можно сказать, более «фундаментальный» характер, чем процесс химического окисления фольги. Мы затрудняемся ответить, с чем связан заметный «провал» верхней точки при значении массы $m=270$ мг. То ли нами была допущена какая-то систематическая небрежность при подготовке этой серии экспериментов, то ли это просто игра статистики.

Конечно же, отсутствие баланса по кислороду не может служить серьезным аргументом для каких-либо выводов. Но именно этот факт послужил стимулом для поиска механизма «примесного» происхождения водорода.

4.3. Поиск источников «примесного» водорода

4.3.1. Титановая фольга

В первую очередь на роль генератора «примесного» водорода была проверена использованная

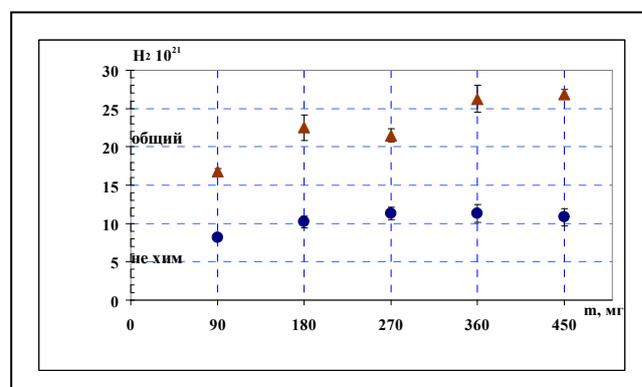


Рис. 7. Зависимость количества водорода от массы фольги: треугольники – регистрируемое количество водорода; кружки – количество водорода, происхождение которого нельзя объяснить химическими или пиролизическим механизмом образования.

в опытах титановая фольга. Хорошо известно, что титан можно насытить водородом до соотношения почти 1:1. Правда при этом большинство физиков забывает, что для того чтобы этого добиться необходимо, нагревать титан до высокой температуры в водородной атмосфере. Поэтому, хотя самопроизвольное насыщение титана водородом и представлялось нам крайне маловероятным, тем не менее, экспериментальное тестирование осуществимости такой возможности было нами проведено.

С этой целью на базе квадрупольного газового масс-спектрометра была собрана экспериментальный стенд, схема которого изображена на рисунке 8. Поскольку на этом же стенде проводились и другие эксперименты, результаты которых будут приведены далее, то мы в этой части статьи опишем измерительную процедуру достаточно подробно, чтобы затем можно было просто только сослаться на это описание.

Специально для данного эксперимента было собрано устройство для нагрева образца. Оно включает небольшой тигель из жаропрочной керамики 1, держатель и нагреватель 2. Держатель и нагреватель были изготовлены из вольфрамовой проволоки диаметром 0,7 мм. Нагреватель имел форму цилиндрической спирали из 10 витков диаметром 5 и шагом 0,5 мм.

Исследуемая фольга (или порошок) 3 заполнял тигель примерно на треть. Спираль опускалась в тигель на расстояние около 3 мм от поверхности фольги так, чтобы верхняя поверхность нагревателя (спирали) была видна в оптическое окно.

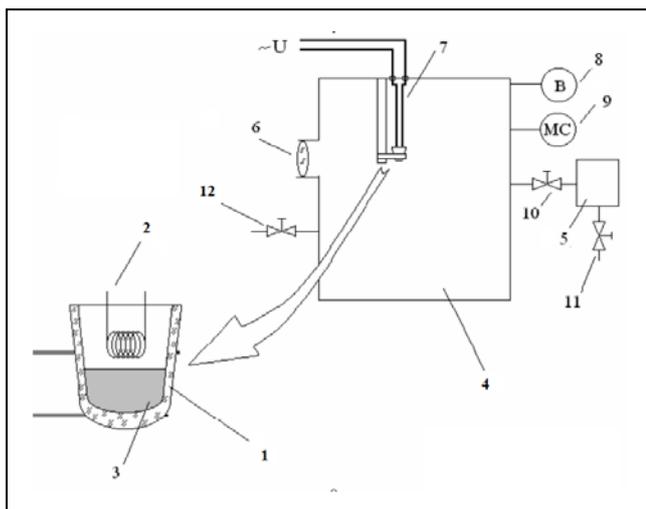


Рис. 8. Схема экспериментальной установки для исследования состава газа: 1 – тигель; 2 – нагреватель; 3 – исследуемый материал; 4 – испытательный объем; 5 – накопительный объем; 6 – окно; 7 – токовые подводы; 8 – вакуумметр; 9 – масс-спектрометр; 10 – вентиль переключной; 11, 12 – вентиль вакуумной откачки.

Измерения проводились по следующей процедуре.

1. Фоновый эксперимент – был предназначен для измерения абсолютного количества и химического состава всех примесей, содержащихся как в вакуумной системе, так и в самом тигле. Для этого в испытательный объем (73 л) помещался пустой тигель и весь объем в течение 15 ч откачивался до давления 2×10^{-7} Торр, без предварительного прогрева. Затем откачка прекращалась и измерялось фоновое газоотделение. Как правило, его значение составляло $\sim 2 \times 10^{-6}$ л·Торр/с.

Далее включался нагреватель, мощность которого составляла 320 Вт, а температура, измеренная по его свечению, превышала 1 600 °С. При этом давление в течение пяти минут вырастало до величины $P = 5 \times 10^{-3}$ Торр, а затем стабилизировалось. После стабилизации давления, нагрев выключался, при этом давление в объеме практически не изменялось. Таким образом, зная величину объема и давления можно посчитать общее количество выделившихся фоновых частиц.

Для измерения химического состава фонового газа, газ из испытательного объема 4 перепускался в откаченный накопительный объем 5. Затем испытательный объем вновь откачивался до фонового давления и в него, дозировано, перепускался исследуемый газ из накопительного объема для последующего масс - спектрометрического анализа. Для набора статистики операция повторялась несколько раз. Из результатов масс - анализа, показанных в верхней строке таблицы 4, видно, что «растворенный» в металле водород отсутствует, а загрязнения носят поверхностный характер.

Таблица 4

Состав газа, выделившегося из исходной фольги и порошкового осадка

Показатель	Количество молекул H ₂ /г	Состав, %/частица				
		H ₂	H ₂ O	CO	CO ₂	Другое
Фон	–	–	5	20	20	10
Фольга	10 ¹⁹	23	24	24	26	3
Порошок	5×10 ²⁰	75	20	5	–	–

2. Для измерения абсолютного количества частиц и химического состава газа, содержащегося в фольге, в тигель помещалась нарезанная фольга $\sim 0,15$ г. После чего по процедуре, аналогичной описанной ранее проводилось измерение газосодержания в исходной титановой фольге. Давление в накопительном объеме после нагрева тигля составило $P \sim 2,5 \times 10^{-2}$ Торр, или $N \sim 10^{19}$ атомов на 1 г фольги (табл. 4). Анализ результатов измерений качественного состава и количества газовых примесей позволяет утверждать, что

газы, содержащиеся в исходной фольге, являются в основном поверхностными и приповерхностными (но не объемными) примесями.

Таким образом, из приведенных результатов следует, что наблюдавшееся в экспериментах аномальное количество водорода не могло быть объяснено его наличием в исходной фольге.

4.3.2. Полиэтилен

Другим вероятным источником водорода мог служить полиэтилен, содержащийся в конструктивных элементах взрывной камеры. Для проверки справедливости такого предположения, все конструкционные элементы, находившиеся внутри герметичного корпуса камеры, содержащие полиэтилен были заменены тефлоновыми. При сохранении прочих равных экспериментальных условий (масса фольги, количество воды, давление балластного газа и т.д.), нами было проведено несколько серий опытов.

Опыты дали следующий результат: содержание водорода в «полиэтиленовом» окружении – $(16,1 \pm 2,2) \%$, а для «тефлонового» окружения – $(14,0 \pm 0,6) \%$. Как видно из приведенных цифр, полиэтиленовые элементы конструкции взрывной камеры не могли служить источником избыточного водорода. Небольшого различия в процентном содержании водорода явно недостаточно для объяснения регистрируемого количества водорода.

Таким образом, если полиэтилен и служит источником водорода, то в очень незначительных количествах. Следует отметить, что в том случае, когда одноразовый стаканчик 9 (рис. 1) был изготовлен из тефлона, он не выдерживал высокого давления, возникающего во взрывной камере, в момент электровзрыва и разрушался, тем самым увеличивая радиус взрывной камеры. А как мы увидим далее, величина диаметра внутреннего стаканчика очень заметно влияет на количество образующегося водорода. В тех случаях, когда вся нижняя часть взрывной камеры (т.е. элементы 5 и 9 рис. 1) была изготовлена из целого куска тефлона, как один конструкционный элемент, различие между двумя сериями опытов в количестве образующегося водорода было совсем незначительным. Таким образом, проведенные тестовые опыты, с одной стороны, как бы усилили физическую интригу: что же служит источником такого количества водорода? А с другой, развеяли надежды на перспективу создания простой и дешевой технологии по утилизации полиэтилена.

4.3.3. Другие источники

Для окончательного исключения из рассмотрения вопроса о «примесном» происхождении водорода нами была проделана следующая серия

опытов. Диаметр внутреннего стаканчика 9 (рис. 1), который обычно составлял 20 мм, был увеличен и соответственно увеличен объем использовавшегося би - дистиллята. Все остальные части конструкции были оставлены без изменений. В этих опытах использовались диэлектрические детали из полиэтилена. Вся серия опытов была проделана при одной и той же величине массы фольги. Процентное содержание образующегося водорода при различных внутренних диаметрах стакана показано на рисунке 9. При увеличении диаметра стакана падает давление во взрывной камере, что, по-видимому, и служит причиной резкого уменьшения количества образующегося водорода. Последний столбик гистограммы показывает, какое процентное содержание водорода может быть объяснено за счет окисления титана и учета газов CO и CO₂. Иными словами, какое количество водорода имеет понятное химическое происхождение. Все значения величин, приведенных на гистограмме имеют ошибку среднего $\sigma_m \sim 1 \%$. Из рисунка видно, что уже при увеличении диаметра стакана до 40 мм весь наблюдаемый водород может быть легко объяснен за счет химического происхождения.

Вся совокупность приведенных ранее результатов позволяет утверждать, что водород образуется в момент электровзрыва за счет какого то неизвестного нам процесса и его происхождение не может быть объяснено химическим или «примесным» механизмом. Мы предположили, что наблюдаемый водород имеет ядерное происхождение.

4.4. Проверка ядерной гипотезы

Для проверки гипотезы были проведены эксперименты с использованием «тяжелой» воды (D₂O) вместо би-дистиллята. В наших опытах

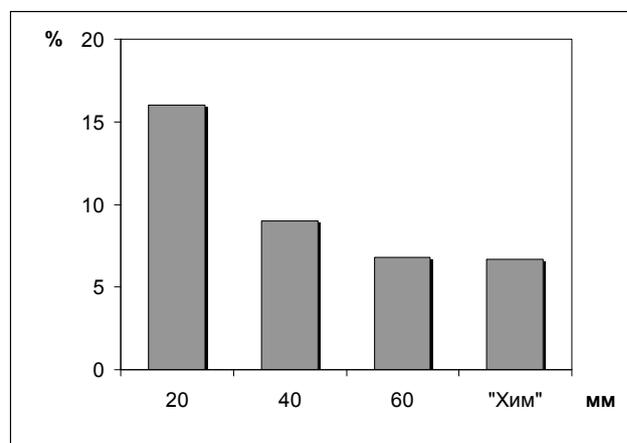


Рис. 9. Процентное содержание образующегося водорода при различных внутренних диаметрах стакана

использовалась вода содержащая 99,8 % D₂O. Скачок давления и измеряемое процентное содержание водорода незначительно отличалось от экспериментов с обычной водой. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что и в том и в другом случае в момент электровзрыва все процессы происходят почти одинаково. Идея экспериментов с тяжелой водой состояла в следующем: если часть водорода имеет ядерное происхождение, то она не должна измениться при замене атомов H на D. Таким образом, задача свелась к определению в газовой пробе относительного содержания H и D в образовавшейся смеси. Следует отметить, что опыты с тяжелой водой проводились исключительно в тефлоновой взрывной камере, а все пробозаборные баллоны предварительно тщательно откачивались с прогревом стенок, чтобы исключить присутствие влаги на их стенках.

Для решения этой задачи нами использовались две методики: оптическая спектроскопия и газовая масс-спектрометрия. Первоначально для верификации оптической методики была изготовлена газовая образцовая калибровочная смесь, содержащая 94 % D и 6 % H. С помощью оптической методики описанной ранее, из измерения отношения интенсивностей H_{α} и D_{α} ; H_{β} и D_{β} для калибровочной смеси было получено значение 95 % D и 5 % H.

Фрагмент калибровочного оптического спектра представлен на рис. 10а. Такое хорошее совпадение результатов оптических измерений со значениями концентрации водорода в калибровочной смеси означает, что сама оптическая установка не содержит «примесных» источников водорода. Таким образом, мы убедились в корректности оптической методики. Для примера, на рис. 10б представлен фрагмент оптического спектра исследуемой газовой смеси. Соотношение водорода к дейтерию в этом опыте, измеренное по отношению оптических линий составило D/H=2/1. Примерно такое же соотношение D к H было получено для того же опыта с помощью газового масс - анали-

затора: D₂/HD/H₂=0,5/0,25/0,25.

Однако следует отметить, что в ряде измерений, проведенных с помощью оптической методики, интенсивность оптических линий дейтерия превышала интенсивность водородных линий, а для ряда опытов дело обстояло наоборот, что указывало на превышение количества атомов водорода по отношению к атомам дейтерия, содержащихся в газовой пробе. Качественно, точно такие же результаты при измерении изотопного состава водорода, давала и методика газовой масс-спектрометрии. Более того, пробы газа, отобранные из газосборной камеры, по прошествии разного времени с момента опыта, могли давать различное изотопное распределение водорода. Но при проведении тестовых измерений на образцовых калибровочных смесях, которые предшествовали измерениям исследуемых смесей, обе методики давали правильные значения изотопного распределения водорода.

Дело оказалось в том, что в течение первых нескольких суток газовая смесь, образовавшаяся в результате электровзрыва, меняла свои физические свойства. Особенно это изменение было заметно при измерениях на оптической установке. В том случае, когда мы пытались получить оптический спектр исследуемой смеси газов в тот же день, когда был произведен опыт, то это было очень сложно сделать, поскольку либо нам вовсе не удавалось зажечь высокочастотный разряд в газе, либо он горел очень неустойчиво. В первые двое суток после опыта газовая смесь проявляла свойства сильно электроотрицательного газа. Если же после принятия дополнительных мер высокочастотный разряд удавалось зажечь, то оптические переходы водорода (всех его изотопов) возбуждались с большим трудом, а в основном мы наблюдали оптические линии аргона.

По прошествии нескольких суток, этот эффект исчезал и интенсивность всех оптических линий становилась соизмеримой с интенсивностью оптических линий калибровочной смеси, которая содержала 20 % (H₂+D₂)+80 % Ar. Что вполне соответствовало данным, полученным в том же опыте с помощью методики газового хроматографа, а также результатам предыдущих измерений. Примерно такой же, но гораздо менее выраженный, эффект наблюдался и на газовом масс-спектрометре. В том случае, если газовая проба отбиралась из установки через несколько дней после проведения электровзрыва, то эффекта электроотрицательности нами не наблюдалось и соотношение атомов дейтерия и водорода составляло

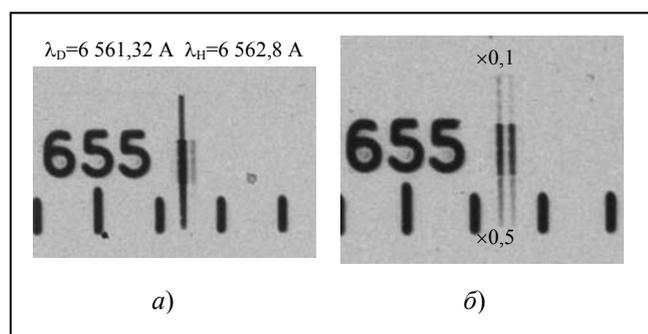


Рис. 10. Фрагмент оптического спектра, снятый с ослаблениями 10 % и 50 %: а) – контроль; б) – эксперимент.

примерно 1:1, что вполне соответствует проверяемой гипотезе. К сожалению, в настоящий момент, опираясь на имеющиеся у нас данные, мы затрудняемся дать однозначную трактовку наблюдаемому эффекту. Следует отметить, что подобный временной эффект наблюдался в работе Сантили [14], в которой исследовался оптический спектр газа, полученного при зажигании электрической дуги в смеси воды с углеводородами.

Поэтому, то обстоятельство, что обе методики, в конечном итоге, имели полу - количественный характер определялось не столько свойствами самих методик, сколько свойствами исследуемой смеси газов. Но, тем не менее, водород в этих экспериментах был зарегистрирован достаточно надежно и это служит серьезным аргументом в пользу ядерного механизма происхождения водорода.

Как было указано ранее, методика измерения парциального давления водорода в газосборной камере позволяла непрерывно проводить долгосрочные измерения. На рис. 11 приведен типичный пример, когда после электровзрыва в течение пяти суток нами проводились измерения. Размер квадратиков на этом рисунке соответствует коридору погрешностей в измерении процентного содержания водорода. Ромбиками показаны погрешности в измерении общего давления смеси газов в камере. Установка располагалась в таком помещении, суточные вариации температуры которого, не сказывались на точности проводимых измерений. Из рисунка наглядно видно, что с течением времени общее давление слегка падает (скорее всего, из-за недостаточной герметичности), а процентное содержание водорода растет. Наблюдаемое увеличение концентрации водорода не может быть объяснено аппаратурным эффектом (например, постепенным насыщением датчика водорода) поскольку измерение было многократно продублировано с помощью газового хроматографа и результаты измерений совпали. Конечно же, чисто интуитивно, возникает желание связать приведенный факт с предыдущим, но, к сожалению, у нас нет достаточных экспериментальных оснований для установления такой связи.

Ради объективности картины явления мы решили привести в настоящей статье результаты предыдущих наших исследований, поскольку они могут быть связаны с приведенными в настоящей статье экспериментальными фактами, но были опубликованы в малодоступных (в особенности для зарубежного читателя) научных изданиях. При исследовании порошка, образовавшегося при взрыве титановой фольги, было обращено

внимание, что часть титанового порошка плавает на поверхности воды оставшейся после электровзрыва. Поскольку хорошо известно, что титан обладает большей плотностью чем вода, то это наблюдение вызвало недоумение. С помощью специального ситечка образцы были собраны и помещены под сканирующий электронный микроскоп DSM-960. Результаты, полученные с помощью электронного микроскопа, приведены на рисунке 12. Из этих фотографий стало ясно, что частицы, плавающие на поверхности воды, являются полыми. Частица, представленная на рисунке 12а была специально нами разрушена с помощью тонкого пинцета. А в частице, представленной на рисунке 12b, отверстие образовалось из-за высокого внутреннего давления в момент ее роста.

Далее полые частицы вместе с другими остатками фольги были исследованы на предмет содержащихся в них газов с помощью методики, подробно описанной в разделе 4.3.1 настоящей статьи. Для этого порошок был высушен, пересыпан в тигель, тщательно взвешен и помещен в измерительный объем, после чего был очень медленно откачен, во избежание возникновения резкого перепада давления и выброса порошка из тигля. Далее осуществлялась процедура нагрева, описанная ранее. Но в отличие от фоновых измерений, давление выделившегося газа в накопительном объеме стабилизировалось на уровне 0,2 Торр.

После откачки измерительного объема тигель с порошком был нагрет второй раз. Мощность нагревателя была поднята до 750 Вт. При максимальной мощности нагревателя давление выросло до величины всего 5×10^{-3} Торр, что свидетельствовало об отсутствии выделения значимого количества водорода.

Далее точно такая же процедура проводилась для следующей порции порошка. Усредненные

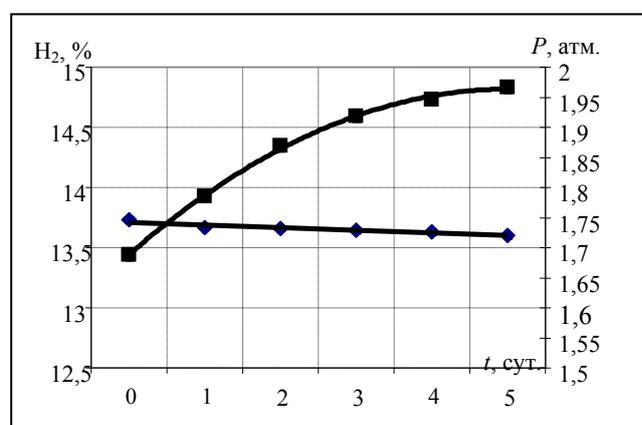


Рис. 11. Зависимость парциального давления водорода от времени

результаты измерений приведены в третьей строчке таблицы 4. Выделившееся количество водорода составило $(4,6 \pm 0,9) \times 10^{20}$ молекул H_2 на грамм порошка, что в ~ 50 раз выше чем в исходной титановой фольге. Таким образом, из проведенных измерений следует, что газ, содержащийся в исследуемом порошке, на $\sim 95\%$ состоит из водорода.

С учетом изложенных ранее результатов, мы можем искать объяснение увеличения концентрации водорода с течением времени либо за счет диффузии водорода сквозь тонкие стенки титановых сфер (рис. 12а) или просто из-за дегазации, насыщенного водородом порошка, либо за счет неизвестного нам ядерного процесса, продолжающегося с характерным для него периодом полураспада после электровзрыва. На основании имеющихся данных невозможно отдать предпочтение какому-то из обсужденных механизмов. Необходимы дальнейшие исследования. Но, исходя из факта «наводороженности» титанового порошка, можно утверждать, что образование основного количества водорода происходит в плазменном канале в момент электровзрыва.

5. Обсуждение полученных результатов

1. В рамках проведенного исследования было надежно установлено, что при электровзрыве титановой фольги в воде происходит образование значительного количества молекулярного водорода $\sim 2 \times 10^{22}$ молекул. Происхождение примерно половины этого количества не может быть объяснено разложением воды.

2. Тщательные поиски источника «примесного» происхождения водорода не увенчались успехом.

3. Авторами была выдвинута гипотеза о ядерном механизме происхождения наблюдаемого молекулярного водорода и получен ряд результатов, поддерживающих выдвинутую гипотезу.

Необходимо подчеркнуть, что под словом «ядерный механизм» мы, конечно, не имеем в виду ни механизм деления, ни механизм синтеза

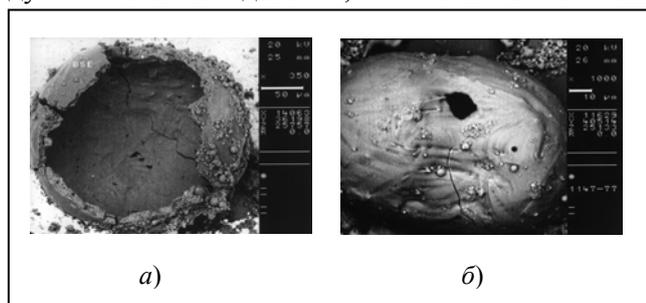


Рис. 12. Электронно-микроскопические фотографии отдельно взятых частиц

ядер, по крайней мере, в их традиционном понимании. Температура, образующейся при электровзрыве, плазмы слишком низка (она близка к температуре солнечной короны [10]) и протекание такого класса ядерных реакций в настоящих экспериментах невозможно. Вместе с тем авторы, на основании предыдущих исследований [10, 15], считают, что в условиях плотной низкотемпературной неравновесной плазмы возможно протекание совсем нового класса ядерных реакций, происходящих без участия сильных взаимодействий. Основным отличием гипотетических ядерных реакций от общеизвестных, является предположение об их коллективном механизме взаимодействия. Следует заметить, что в физике плазмы роль коллективных взаимодействий давно хорошо изучена и сомнений не вызывает, в то время как для ядерной физики такое предположение является, по крайней мере, весьма экстравагантным.

И, тем не менее, нами была разработана [15] феноменологическая модель такого гипотетического явления, в основе которой лежат: требование выполнения основных законов сохранения (энергии, барионного, лептонного и электрических зарядов); компьютерное моделирование, использующее факт конечности (~ 300) изотопов стабильных ядер. Предсказания феноменологической модели были проверены экспериментально [15]. Так из предсказаний модели следовало, что если произвести электровзрыв титановой фольги в соли ванадия, то должны образоваться ядра ^{57}Fe . Поскольку в природе изотоп ^{57}Fe является достаточно редким (его процентное содержание в смеси изотопов железа составляет всего $\sim 2,2\%$), то его обогащение в смеси изотопов легко измеряется. Такие опыты были проведены, и предсказание модели подтвердилось, более подробно это изложено в работе [15]. Конечно же, феноменологическая модель не содержит никаких предположений относительно механизма протекания ядерных реакций и носит скорее запретительный, чем предсказательный характер.

Непротиворечивость законам сохранения не может служить достаточным условием для реального (наблюдаемого) существования механизма коллективных ядерных реакций. Поэтому для описания такого механизма необходимо введение какого-то принципиально нового объекта в базис наших фундаментальных представлений. Принимая во внимание результаты экспериментальных исследований [10, 11, 15...17], авторы настоящей статьи считают, что в природе возможно существование легкого лептонного магнитного монополя, теоретически предсказанного Ж. Лошаком в

его работах [18]. Магнитный монополю Лошака представляет собой что-то подобное магнитно-возбужденному состоянию нейтрино. Возможный механизм рождения магнитных частиц в описанных экспериментах, как следствие нарушения электромагнитной симметрии и их связь со Стандартной Моделью исследованы Н. Stumpf в его работах [19]. Исследование вопроса о возможном участии магнитного монополя в механизме образования водорода не являлся целью настоящей статьи. Однако привлечение такой гипотезы позволило бы логически просто объяснить наблюдаемые во времени изменения физических свойств смеси газов. Но для строгого научного обоснования такой гипотезы необходимы дополнительные исследования.

6. Выводы и благодарности

Следует отметить, что хотя приведенные результаты по измерению относительного содержания водорода и дейтерия и представляются надежными, но, на наш взгляд, они не могут быть положены в основу окончательных выводов о ядерной природе наблюдаемого водорода. Для окончательных выводов требуется проведение дополнительных исследований. Однако вероятность того, что наблюдаемый в описанных экспериментах водород, имеет ядерное происхождение, на наш взгляд, гораздо выше вероятности того, что этот водород имеет химическое происхождение за счет какого-то неучтенного нами химического процесса.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность И.А. Егорову за финансовую поддержку настоящего исследования и А.И. Абрамову, который выполнял основные административные обязанности в течение всего времени исследований. Мы выражаем благодарность сотрудникам РНЦ «Курчатовский Институт», которых мы перечислим без указания конкретных диагностик, за проведение многочисленных измерений: Л.А. Елесину, В.М. Доровскому, В.Л. Столярову, С.В. Дёмкину, Б.Н. Новоселову, В.Л. Кузнецову. Мы благодарны сотрудникам «РЕКОМ» за их многолетний труд и перечисляем тех, без чьего деятельного участия проведение экспериментов было бы просто невозможно: А.А. Гуляеву,

С.В. Петрушко, В.Д. Петрушко, П.Ф. Страшко,

В.Л. Шевченко, А.Б. Гавердовскому, В.Н. Баюшкину, Е.Н. Сергееву, А.П. Говорун, Е.Н. Попелеву.

Эксперименты проводились в «РЕКОМ» (дочерняя компания Института Атомной Энергии им. И. В. Курчатова) на территории ИАЭ с 2004 года. Однако, в силу различных причин, которые недостойны обсуждения на страницах научной статьи, они были прекращены в 2007 г.

Контактная информация:

E-mail: urlleon@ya.ru, filippov-atom@ya.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Exploding wires / edited by W.G. Chace, H.K. Moore. New York: Plenum Press, 1962.
2. Bakshaev Y. et al. Plasma Phys. 2001. Rep. 27. 1039; Velikovich A. et al. Phys. Plasmas. 2007. 14. 022706.
3. Уруцкоев Л.И., Филиппов Д.В. УФН. 2004. 174. 1355.
4. Bosch F., Faestermann T., Friese J. et al. Phys. Rev. Lett. 1996. 77. 5190.
5. Jung M., Bosch F., Beckert K. et al. Phys. Rev. Lett. 1992. 69, 2164.
6. Филиппов Д.В. ЯФ. 2007. 70. 280; 2068.
7. Ерма V.A. Phys. Rev. 1957. 105. 1784.
8. Соколов А.А., Тернов И.М., Жуковский В.Ч. Квантовая механика. М.: Наука, 1979.
9. Кадомцев Б.Б., Кудрявцев В.С., Письма в ЖЭТФ. 1971. 13, 61.
10. Уруцкоев Л.И., Ликсонов В.И., Циноев В.Г. Прикладная физика. 2000. 83; Urutskoev L.I., Liksonov V.I., Tsinoev V.G. Ann. Fond. L.de Broglie. 2002. 27. 701.
11. Волкович А.Г., Говорун А.П., Гуляев А.А. и др. Кр. сообщ. по физике ФИАН. 2002. 45; Volkovich A.G., Govorun A.P., Gulyaev A.A. et al. Ann. Fond. L.de Broglie. 2005.30. 63.
12. www.insovt.ru.
13. Доровской В.М., Елесин Л.А., Столяров В.Л. и др. Прикладная физика. 2006. № 4. 28.
14. Santilli R.M., Foundations of Hadronic Chemistry. With Applications to New Clean Energies and Fuels, Kluwer Academic Publishers. Boston-Dordrecht-London, 2001.
15. Рухадзе А.А., Уруцкоев Л.И., Филиппов Д.В. Кр. сообщ. по физике ФИАН. 2004. № 39; Filippov D.V., Urutskoev L.I. Ann. Fond. L.de Broglie. 2004. 29. Hors Serie 3, 1187.
16. Ivoilov N.G., Urutskoev L.I. Ann. Fond. L.de Broglie. 2004. 29. Hors Serie 3. 1177.
17. Priem D., Racineux G., Lochak G. et al. Ann. Fond. L.de Broglie. 2008. 33. 129.
18. Lochak G., Naturforsch Z. Advanced Electromagnetism / Eds. T.W. Barret, D.M. Grimes. 2007. 62a. 231; Singapore: World Scientific, 1995.
19. Stumpf H., Naturforsch Z. 2005. 60a. 696; 2006. 61a. 439.

Статья поступила в редакцию 01.01.2012 г.