

## НИКЕЛЬ-ВОДОРОДНЫЕ РЕАКТОРЫ: ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ, ИЗОТОПНЫЙ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ТОПЛИВА

<sup>1</sup>Пархомов А.Г., <sup>2</sup>Алабин К.А., <sup>2</sup>Андреев С.Н., <sup>1</sup>Забавин С.Н., <sup>3</sup>Соболев А.Г.,  
<sup>1</sup>Тимербулатов Т.Р.

<sup>1</sup>Опытно-конструкторская лаборатория "К.И.Т."

Москва 121108, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова, Российская академия наук, <http://www.gpi.ras.ru>

Москва 119991, Российская Федерация

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева, Российская академия наук, <http://www.lebedev.ru>

Москва 119991, Российская Федерация

Поступила в редакцию 19.06.2017

При взаимодействии водорода с рядом металлов, в том числе, с никелем, наблюдаются не только механические и химические изменения, но и такие неординарные явления, как аномально большое тепловыделение и изменение изотопного и элементного состава. Дан обзор экспериментов, в которых исследуются эти явления. Представлены результаты анализа изотопного и элементного состава топлива и вещества около активной зоны никель-водородных реакторов до и после работы с наработкой избыточной энергии до 790 МДж. Достоверных изменений изотопного состава никеля и лития не обнаружено. Значительное возрастание концентрации примесей целого ряда нуклидов обнаружено не только в топливе, но и в конструкционных элементах, примыкающих к активным зонам реакторов.

*Ключевые слова:* водород, никель, тепловыделение, изотопный состав, радиация

УДК 53.043

### СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (74)
  2. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НИКЕЛЕМ, НАСЫЩЕННЫМ ВОДОРОДОМ (75)
  3. ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЫ АНДРЕА РОССИИ (77)
  4. ПОПЫТКИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ РЕАКТОРОВ РОССИИ (79)
  5. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА (82)
  6. РЕАКТОР АП2 (82)
  7. ТЕПЛОГЕНЕРАТОР С ПРОТОЧНЫМ КАЛОРИМЕТРОМ ("ПРОТОК-6") (83)
  8. РЕАКТОР ВВ3 (87)
  9. РЕАКТОР КВ3 (88)
  10. ОБСУЖДЕНИЕ (90)
  11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (90)
- ЛИТЕРАТУРА (91)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В марте 1989 г. М.Флейшманн и С.Понс (США) продемонстрировали устройство, которое в процессе электролиза тяжелой воды при наличии палладиевого катода выделяло энергии

в несколько раз больше подводимой [1]. Авторы объясняли это тем, что выделяющийся на катоде дейтерий проникал в палладий, обладающий высокой способностью адсорбировать водород (дейтерий). Высокая концентрация ядер дейтерия, внедренных в кристаллическую решетку палладия, делает возможным слияние двух ядер дейтерия в ядро гелия или трития с выделением большой энергии.

Обычно отчет истории исследований аномально большого тепловыделения и иных явлений, происходящих при насыщении некоторых материалов водородом, начинают с этой демонстрации, хотя результаты, указывающие на существование этого феномена, были получены раньше. Например, еще в 1950-х годах И.С.Филимоненко (Россия) создал установку, в которой происходило необычайно большое тепловыделение при температуре до 1150°C [2]. Главной частью реактора Филимоненко была насыщенная дейтерием металлическая труба, изготовленная из сплава, содержавшего палладий.

Реакция научного сообщества на демонстрацию Флейшмана и Понса была весьма бурной. В научных лабораториях различных стран были предприняты попытки повторить эти эксперименты. Но плохая воспроизводимость результатов и отсутствие вразумительного объяснения привели к тому, что значительная часть научной общественности стала относиться к работам в этой области скептически или даже резко отрицательно. Неприятно способствовало и то, что такого рода явления получили название «холодный ядерный синтез», хотя, с точки зрения существующей системы научных знаний, преобразования вещества на ядерном уровне при энергиях порядка 1 эВ невозможны. Но даже если предположить существование какого-то непонятого механизма такого рода ядерных преобразований, они, по существующим представлениям, неизбежно должны сопровождаться смертельным гамма и нейтронным излучением. То, что исследователи не гибли, казалось бы, наглядно демонстрировало ошибочность их экспериментов.

Тем не менее, исследования в этом направлении продолжались [3-9]. Методика такого рода экспериментов обычно заключается в насыщении водородом (дейтерием) веществ, обладающих способностью жадно поглощать этот газ (обычно используется палладий, титан или никель). Для этого, помимо простого выдерживания в атмосфере водорода, используется электролиз или электрический газовый разряд. Наводороженные образцы подвергаются разного рода воздействиям. При этом делаются измерения, которые могут свидетельствовать о протекании изменений на ядерном уровне. На ядерные изменения может указывать тепловыделение, превышающее возможности химических реакций, появление нейтронов, гамма и рентгеновского излучения, возникновение трития, изменение изотопного состава. Кроме того, изучалась возможность протекания ядерных трансмутаций в биологических системах [10, 11].

В настоящей работе представлена информация о результатах анализа тепловыделения, а также изменений в топливе и в конструкционных материалах, происшедших

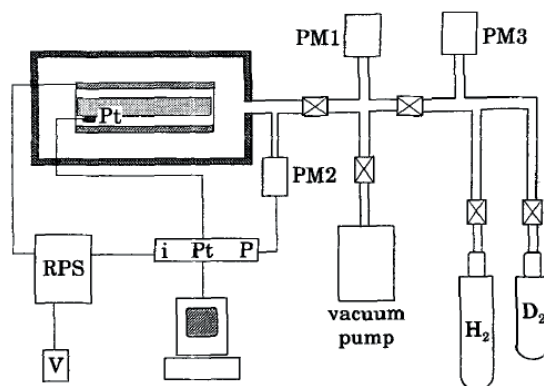
в нескольких никель-водородных реакторах, созданных нашим коллективом.

**2. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НИКЕЛЕМ, НАСЫЩЕННЫМ ВОДОРОДОМ**

До недавнего времени у исследователей феномена аномального тепловыделения наибольшим вниманием пользовались палладий или титан, обладающие наиболее яркой способностью поглощать водород. Хотя уже в 1992 г. на физическом факультете университета в Сиене (Италия) группой исследователей во главе с Франческо Пиантелли были проведены эксперименты, в которых было обнаружено аномально большое выделение тепла при взаимодействии с водородом никеля [12].

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Камера реактора длиной 100 мм имеет диаметр 50 мм. В камере расположен нагреватель из платинового провода. Внутри нагревателя помещается либо стержень из никеля длиной 90 мм диаметром 5 мм, либо стержень-муляж из нержавеющей стали такого же размера. Температура этих стержней измерялась платиновым термометром. Камера могла вакуумироваться турбомолекулярным насосом и наполняться водородом или дейтерием из газовых баллонов. Давление в камере измерялось пьезоманометром. Нагреватель питался от стабилизированного источника постоянного тока мощностью до 300 Вт. Величины давления, температуры и тока нагревателя непрерывно регистрировались компьютером.

Были сделаны калибровочные измерения зависимости температуры стержня из нержавеющей стали от мощности нагрева при давлениях в диапазоне от максимально



**Рис. 1.** Схема установки для насыщения никеля водородом и исследования тепловыделения [12].

достижимого вакуума до атмосферного. Далее, в установку поместили стержень из никеля и циклически проводили откачку и наполнение камеры водородом (естественная смесь протия и дейтерия) до давления около 0.55 бар при температуре 440°C. Каждый раз давление стабилизировалось через час после снижения давления примерно на 0.05 бар в результате поглощения водорода никелем.

В одном из циклов откачки-наполнения температура неожиданно поднялась с 440° до 480°C при неизменной мощности электронагрева. Используя калибровочную кривую мощность нагрева-температура, авторы сделали вывод, что к электронагреву стало добавляться тепло мощностью около 20 Вт. После нескольких дополнительных циклов избыточная мощность достигла 50 Вт (рис. 2).

На рис. 2 видно, что одинаковая температура никелевого стержня, насыщенного водородом, достигается при мощности примерно в два раза меньшей, чем при использовании муляжа или никеля, не насыщенного водородом.

Работа установки продолжалась непрерывно 24 суток при средней избыточной мощности 44 Вт. Всего за это время было выработано около 90 МДж тепловой энергии сверх затраченной электроэнергии.

В дальнейшем были созданы аналогичные, но более совершенные установки [13-15]. Одна из них, вырабатывавшая 68 Вт избыточной мощности, проработала 278 суток, произведя около 900 МДж тепла сверх затраченной электроэнергии. Другая, вырабатывавшая 18 Вт

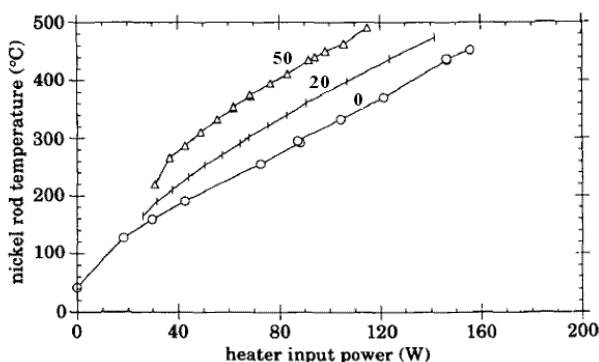


Рис. 2. Температура стержня в зависимости от мощности электронагрева при разных величинах аномального энерговыделения 0 Вт, 20 Вт, 50 Вт [12]. Зависимость «0» получена для стержня из нержавеющей стали и стержня из никеля, не насыщенного водородом.

избыточной мощности, проработала 319 суток, произведя около 600 МДж тепла сверх затраченной электроэнергии. Столько тепла выделяется при сгорании более 10 кг нефтепродуктов. Заметим, что масса водорода, поглощенного никелем и частично прореагировавшего, меньше 100 мг.

После работы реактора на протяжении 22 дней (произведено 35 МДж избыточной энергии) поверхность никелевого образца была подвергнута анализу при помощи сканирующего электронного микроскопа [13]. Было обнаружено наличие хрома и марганца, присутствие которых до пребывания в реакторе не было заметно.

Для выяснения радиационной обстановки около работающего реактора были проведены специальные исследования с привлечением специалистов в области регистрации ядерных излучений. Для измерения возможного нейтронного излучения были использованы три <sup>3</sup>He счетчика, окруженных парафиновыми замедлителями, а также активационная методика с использованием золотой фольги [14]. При избыточной мощности тепловыделения 22-38 Вт было зарегистрировано нестабильное излучение до 6000 нейтронов в секунду. Это в 10<sup>11</sup> раз меньше, чем должно было бы испускаться, если бы избыточная мощность вызывалась известными механизмами ядерных реакций.

Возможное гамма излучение регистрировалось сцинтилляционным NaI(Tl), а также полупроводниковым германиевым детектором. Результаты измерений мало отличались от естественного фона радиоактивности [15]. В более поздних экспериментах было обнаружено излучение с энергией 511 кэВ, что указывает на протекание β<sup>+</sup>-распадов. Описание экспериментов итальянских физиков, продолжающихся до настоящего времени, можно найти на сайте [16]. Одна из установок работала на протяжении нескольких месяцев без дополнительной подпитки электроэнергии и без добавления водорода, непрерывно выделяя 70 Вт тепловой мощности.

Излучение нейтронов было зарегистрировано также российскими исследователями при нагреве в интервале температур 250-350°C порошка никеля в водородной среде при давлении до 100 бар [17]. Излучение нейтронов происходило в виде коротких всплесков или

серий всплесков продолжительностью до нескольких десятков минут. Суммарный выход нейтронов достигал 500000. Для регистрации нейтронов был использован  $^3\text{He}$  счетчик с водным замедлителем, а также активационная методика с использованием индия. Результаты измерений обеими методиками в пределах возможной ошибки совпадают.

Из других работ, в которых было зарегистрировано тепловыделение сверх затраченной электроэнергии, следует отметить исследования коллектива во главе с сотрудником итальянского национального института ядерной физики Франческо Челани [18], а также Акито Такахашии (университет г. Осака) и Акира Китамура (университет г. Кобе) [19], исследовавших нанопорошок сплава никель-медь на матрице  $\text{ZrO}_2$ . Они зарегистрировали выделение энергии до 800 эВ на один поглощенный атом водорода, что в десятки раз превосходит энерговыделение, возможное в химических реакциях.

**3. ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЫ АНДРЕА РОССИ**

Несмотря на достигнутые успехи, до недавнего времени исследования этих аномальных явлений профессионалами-ядерщиками всерьез не воспринимались. Ситуация изменилась, когда итальянскому инженеру Андреа Росси и профессору Болонского университета Серджио Фокарди удалось перейти от исследовательских макетов к установкам, производящим энергию в промышленных масштабах [20].

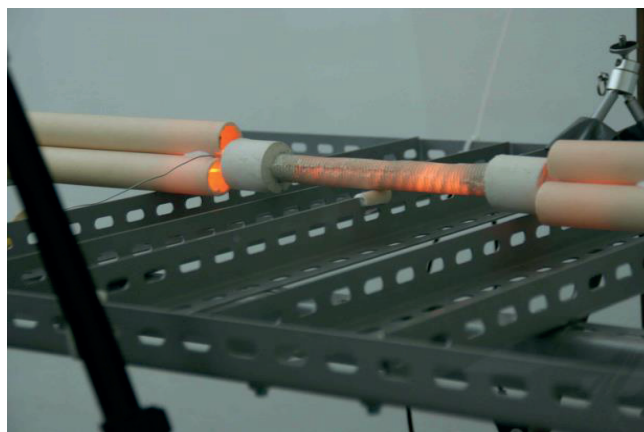
Впервые устройство, производящее тепло мощностью 12.5 кВт, было продемонстрировано 15 января 2011 г. "Топливом" этого реактора служили никель и водород. Структура этого устройства в общих чертах описана в патенте [21], но детальное описание является коммерческой тайной. Во время публичных демонстраций наблюдателям разрешалось лишь осматривать устройство снаружи, измерять входную и выходную энергии и контролировать уровень радиации.

28 октября 2011 г. Росси продемонстрировал реактор, который на протяжении 5.5 часов выдавал мощность 470 кВт в самоподдерживающемся режиме. Тщательные измерения радиации около работающей установки не выявили заметного отличия от фона. Хотя достигнутые в испытаниях

результаты впечатляют, конструкцию установки нельзя признать совершенной, так как она состояла из 300 модулей, размещенных в грузовом контейнере. Для ее работы были нужны баллоны с водородом и много воды.

Реакторы иной конструкции Росси продемонстрировал в декабре 2012, марте 2013 и в марте 2014 г.г. Эти устройства привлекают компактностью и простотой. Работа этих реакторов контролировалась международной комиссией компетентных ученых, которые выпустили два пространных отчета [22, 23]. Особый интерес представляет последний отчет. Хотя он не раскрывает внутреннее устройство продемонстрированного реактора, детальность наблюдений за работой устройства и тщательность проведенных анализов позволяют о многом догадаться. Исследования были выполнены в Барбенго (Лугано, Швейцария) с использованием оборудования, которое, по утверждению экспертов, никоим образом не связано с Андреа Росси или его партнерами. В работе принимали участие Giuseppe Levi (Bologna University, Italy), Evelyn Foschi (Bologna, Italy), Bo Höistad, Roland Pettersson and Lars Tegnér (Uppsala University, Sweden), Hanno Essén (Royal Institute of Technology, Sweden), David Bianchini (эксперт в области измерений радиации). Опубликовано изложение этого отчета на русском языке [24].

Реактор весит 450 г. Внешний вид реактора – керамический цилиндр диаметром 2 см длиной 20 см с выступами, улучшающими конвективный теплообмен (рис. 3). С обеих



**Рис. 3.** Реактор Росси во время испытаний. С каждой стороны расположено по три керамических трубы с проводами, по которым подводится электропитание, необходимое для предварительного разогрева реактора.

сторон этот цилиндр заканчивается двумя керамическими наконечниками диаметром 4 см длиной 4 см. На наконечниках находятся выводы трех нагревателей. В одном из наконечников имеется отверстие диаметром 4 мм. В отверстие вставляется керамическая пробка, в которую вмонтирован термопарный зонд. Через это отверстие осуществляется загрузка топлива.

Трехфазное электропитание нагревателей подается с двух сторон по медным проводам, расположенным в керамических трубах. Для регулировки электрической мощности использован программируемый источник питания, использующий для поддержания заданного режима сигнал с термопарного зонда.

Для определения потребляемой энергии использованы измерители мощности и анализаторы спектра, а также цифровые мультиметры. Производимая энергия определялась путем измерения температуры поверхности при помощи тепловизоров и расчета на этой основе потерь энергии за счет излучения и конвекции. Вся использованная измерительная аппаратура была проверена на предприятиях-изготовителях и перепроверена на месте применения. Информация, поступающая со всех датчиков, регистрировалась в памяти компьютеров для последующего тщательного анализа.

Все стадии испытаний были под непрерывным наблюдением экспертов. На первом этапе был исследован реактор на «холостом ходу» (без топлива). В этом случае тепловая энергия, рассеиваемая реактором, равна подводимой электроэнергии, что позволило сделать калибровочные измерения, используя результаты которых можно определить энерговыделение реактора в рабочем режиме.

После 23-часовой работы без топлива реактор был выключен и отсоединен от электрических кабелей, что позволило загрузить топливо массой около 1 г, имеющего вид мелкого порошка. Перед этим загружаемый порошок был насыпан в специальный контейнер, и его радиоактивность была измерена в низкофоновой свинцовой камере. После загрузки топлива отверстие было закрыто керамической пробкой, содержащей термопарный зонд, и запечатано глиноземистым цементом. Были подключены

электрические кабели и включен постепенно нарастающий нагрев. Увеличение мощности нагрева продолжалось до тех пор, пока средняя температура поверхности реактора не достигла  $1260^{\circ}\text{C}$  при потребляемой нагревателем мощности 810 Вт. Работа в этом режиме продолжалась почти 10 суток. В конце этого периода эксперты решили увеличить мощность, и подняли ее до 900 Вт. В результате, за несколько минут температура реактора возросла до  $1400^{\circ}\text{C}$ . Такому росту температуры соответствует увеличение тепловыделения на 700 Вт, хотя мощность электронагрева возросла меньше чем на 100 Вт. Дальнейшая работа происходила при мощности электронагрева около 900 Вт вплоть до заранее намеченного срока выключения (32 суток после включения реактора с топливом). Реактор был выключен путем постепенного снижения мощности электронагрева. До этого времени работа реактора происходила без заметного снижения мощности тепловыделения, что свидетельствует о том, что ресурс работы реактора после 32-суточной работы не был исчерпан.

Измерения показали, что тепловыделение реактора намного больше потребленной электроэнергии. При потребляемой мощности 790 Вт в первые 10 суток работы реактора добавка к потреблявшейся мощности, в среднем, 1650 Вт. После увеличения потребляемой мощности до 900 Вт величина добавки, в среднем, 2300 Вт.

В отчете сделан расчет энергии, произведенной за все время работы реактора сверх потребленной электроэнергии: 1.6 МВт·ч или 5800 МДж. Отнеся эту величину к массе топлива 1 г, получим оценку плотности энерговыделения  $1.6 \cdot 10^9 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг} = 5.8 \cdot 10^6 \text{ МДж} / \text{кг}$ . Это в сотни тысяч раз больше того, что можно получить при сжигании нефтепродуктов.

После охлаждения реактора было вскрыто отверстие на наконечнике, извлечено отработавшее топливо, насыпано в контейнер и проверено на радиоактивность аналогично проверке топлива перед загрузкой. После этого отработавшее топливо было подвергнуто разнообразным анализам.

Анализ элементного и изотопного состава топлива сделан тремя независимыми группами исследователей, специализирующихся

в применении различных методик. Был использован сканирующий электронный микроскоп (SEM) для изучения поверхностной морфологии топливного порошка. Применялся метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS), дисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS), времяпролетная масс-спектрометрия вторичных ионов (ToF-SIMS), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) и атомно-эмиссионная спектроскопия (ICP-AES). Применение комплекса перечисленных методов позволяет дать довольно обширную информацию о свойствах топлива до и после работы реактора.

Проведенные анализы позволили сделать следующие заключения.

Исходное топливо в основном состоит из порошка никеля в виде гранул размером несколько микрон, имеющего естественный изотопный состав. Помимо никеля, в топливе обнаружена примесь Li, Al, Fe и H. Анализ ICP-AES показал, что соотношение содержания Li и Al соответствует молекуле алюмогидрида лития Li[AlH<sub>4</sub>]. Этот компонент, вероятно, используется для производства свободного водорода при нагревании. Кроме того, EDS и XPS анализы обнаружили присутствие O и C. Анализ ToF-SIMS показал наличие протия, но не заметил присутствие дейтерия. Количество большинства элементов существенно отличается в разных гранулах.

Отработавшее топливо имеет гранулы иного вида, чем топливо исходное. Элементный и изотопный состав гранул различен, тем не менее, очевидно, что изотопный состав Li и Ni в отработавшем топливе радикально отличается от измеренного изотопного состава исходного топлива (Таблица 1).

Хотя результаты измерений изотопного состава двумя методами не вполне совпадают, можно сделать следующие выводы

1. Соотношение изотопов лития и никеля в исходном топливе в пределах возможной ошибки не отличается от природного.

2. В отработавшем топливе существенно возросло относительное содержание <sup>6</sup>Li и снизилось содержание <sup>7</sup>Li.

Таблица 1.

Изотопный состав лития и никеля в исходном и отработавшем топливе (%), измеренный методами ToF-SIMS и ICP-MS, а также природное соотношение изотопов в этих элементах

	Исходное топливо		Отработавшее топливо		Природа
	ToF-SIMS	ICP-MS	ToF-SIMS	ICP-MS	
<sup>6</sup> Li	8.6	5.9	92.1	57.5	7.5
<sup>7</sup> Li	91.4	94.1	7.9	42.5	92.5
<sup>58</sup> Ni	67	65.9	0.8	0.3	68.1
<sup>60</sup> Ni	26.3	27.6	0.5	0.3	26.2
<sup>61</sup> Ni	1.9	1.3	0.0	0.0	1.8
<sup>62</sup> Ni	3.9	4.2	98.7	98.3	3.6
<sup>64</sup> Ni	1.0		0.0		0.5

3. В отработавшем топливе очень сильно снизилось содержание всех изотопов никеля, кроме <sup>62</sup>Ni. Содержание этого изотопа возросло с 3.6% до 99%.

Столь сильное изменение изотопного соотношения в литии и никеле после 32-суточной работы свидетельствует о том, что зарегистрированное аномально большое энерговыделение связано с изменениями на ядерном уровне.

Для регистрации возможного ионизирующего излучения были использованы сцинтилляционные датчики и счетчики Гейгера, а также термолюминесцентные дозиметры, что позволило регистрировать альфа, бета, гамма излучение и нейтроны около работающего реактора. Помимо этого, измерялась радиоактивность топлива до засыпки в реактор и после окончания работы. Ни один из этих приборов не зарегистрировал отличие от фона ни во время работы реактора, ни при исследовании исходного и отработавшего топлива.

#### 4. ПОПЫТКИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ РЕАКТОРОВ РОССИ

Исследования в области холодных ядерных трансмутаций – претензия на эксперименты, показывающие путь для приобретения принципиально новых знаний и открытия новых возможностей для человеческого сообщества. Но с точки зрения устоявшихся научных знаний ядерные трансмутации при низких энергиях, да еще и без ядерной

радиации, абсолютно невозможны. При таких обстоятельствах первое, что необходимо сделать – убедиться, что столь необычные результаты – не следствие ошибок или сознательных фальсификаций. Даже самая строгая и честная экспертиза здесь недостаточна. Необходимо независимое воспроизведение этих результатов другими людьми, в иных лабораториях, с другим оборудованием.

После публикации отчета экспертов о работе последнего варианта Росси в общих чертах прояснилось его устройство и стало, наконец, возможным его воспроизведение. Этот реактор, по сути, запечатанная жаростойким цементом керамическая трубочка, в которой находится порошок никеля с добавкой алюмогидрида лития  $\text{Li}[\text{AlH}_4]$ . Для инициации процесса трубочку необходимо медленно нагреть до температуры 1200-1400°C. Прежде всего, при нагреве происходит разложение алюмогидрида лития. Выделившийся водород очищает поверхность никеля от окислов. После этого водород начинает растворяться в никеле. После достижения достаточно высокой температуры в никеле с растворенным в нем водородом, литии и алюминии начинается процесс с высоким тепловыделением.

Поняв это, множество исследователей во всем мире стали пытаться воспроизвести теплогенератор Росси. Но это оказалось не столь простой задачей, как кажется на первый взгляд. Надо найти конструктивные материалы, выдерживающие агрессивную среду при высокой температуре и повышенном давлении, обеспечить герметизацию. Нужны электронагреватели, длительно работающие при высокой температуре. Надо обеспечить измерение температуры порядка 1400°C и разработать способы контроля мощности работающего реактора.

Сообщение о первом успешном испытании аналога реактора Росси было сделано уже в декабре 2014 г. [25]. Для изготовления реактора использована трубка из корундовой керамики длиной 120 мм, наружным диаметром 10 мм и внутренним диаметром 5 мм (Рис. 4). На трубку навит электронагреватель из жаростойкого провода. Внутри трубки находится 1 г порошка никеля, смешанного с 0.1 г алюмогидрида лития.

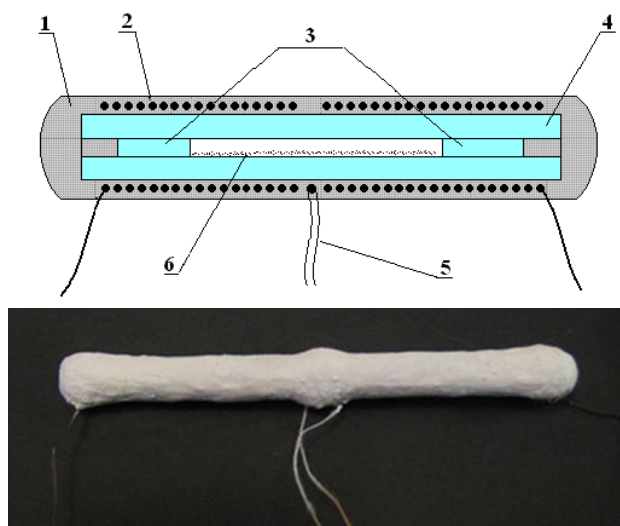


Рис. 4. Схема аналога реактора Росси [26]: 1 – цемент, 2 – электронагреватель, 3 – керамические пробки, 4 – керамическая трубка, 5 – термопара, 6 – порошок  $\text{Ni} + \text{LiAlH}_4$ . Внизу – внешний вид.

С наружной поверхностью трубки контактирует термопара. Концы трубки запечатаны жаростойким цементом. Таким же цементом покрыта вся поверхность реактора.

В качестве источника питания для нагревателя применялся трансформатор с переключающимися обмотками. Переключение как ручное, так и автоматическое с использованием регулятора, управляемого сигналом термопары. Нагрев до рабочей температуры продолжался 10-12 часов. Для измерения потребляемой электроэнергии использованы вольтметр и амперметр, а также электросчетчик, позволяющий передавать информацию на компьютер. Для контроля уровня радиации использованы счетчик Гейгера СИ-8Б, дозиметр ДК-02 и нейтронно-активационная методика с использованием индия.

Использованная экспертами при проверке реактора Росси методика измерения мощности тепловыделения на основе показаний тепловизоров [24] слишком сложна. В данном эксперименте использована методика, основанная на количестве выкипающей воды. Эта методика отработана и многократно проверена в разнообразных экспериментах. Реактор находится в закрытом металлическом сосуде (рис. 5). Этот сосуд погружен в воду. Часть воды уходит в виде пара. Измерив убыль воды, по известной величине теплоты парообразования (2260 кДж/кг) нетрудно

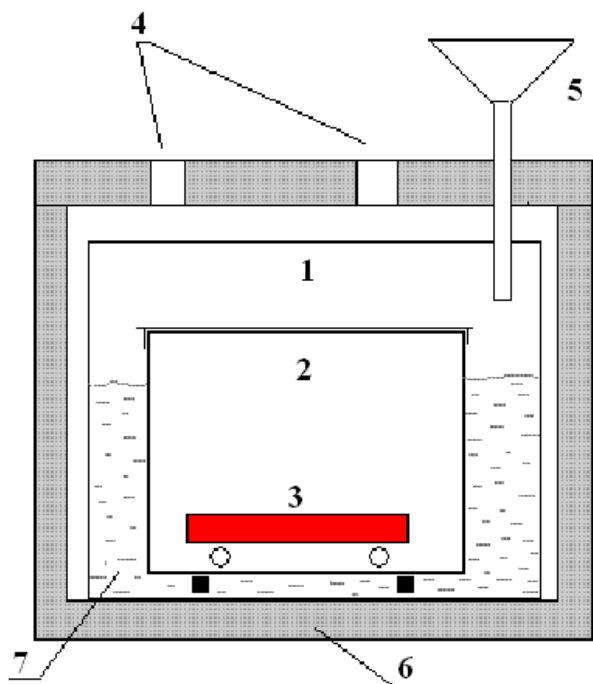


Рис. 5. Схема калориметра с испаряющейся водой: 1 – сосуд для воды, 2 – сосуд для реактора, 3 – реактор, 4 – отверстия для выхода пара, 5 – воронка для долива воды, 6 – теплоизоляция, 7 – вода.

вычислить выделившееся тепло. Поправку на потерю тепла через теплоизоляцию можно рассчитать по скорости охлаждения после выключения реактора.

Детальное описание хода экспериментов и методики обработки результатов можно найти в статье [25]. Здесь приведены лишь обобщенные результаты, полученные в экспериментах, проведенных в декабре 2014 и январе 2015 г. (Таблица 2). Помимо экспериментов с реакторами, загруженными смесью Ni + Li[AlH<sub>4</sub>], проведены опыты с макетами реактора без топлива.

Существенное превышение выделившейся тепловой энергии над поглощенной электроэнергией наблюдалось только у реакторов с топливом при температурах около 1080°C и выше. В случаях с макетами реактора, так же, как и с реакторами с топливом при температуре ниже 1080°C, отношение выделившейся тепловой энергии к поглощенной электроэнергии близко к 1.

Таким образом, эти эксперименты показали, что смесь никеля и алюмогидрида лития, нагретая в герметичной керамической трубке до температуры выше 1080°C, действительно, производит тепла значительно больше, чем потребляет. Уровень ионизирующих излучений во время работы реактора заметно не превышал фоновые показатели. Плотность потока нейтронов не выше 0.2 нейтр/см<sup>2</sup>с.

В дальнейшем было создано много экспериментальных установок, подтвердивших наличие избыточного тепловыделения в устройствах, аналогичных теплогенератору Росси. В статье [26] описано 15 устройств такого рода, созданных в России, США и Китае. В этой статье мы дадим описание некоторых из множества устройств, созданных в нашем коллективе.

### 5. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА

Сделаем оценку возможных изменений изотопного состава топлива, исходя из предположения, что избыточное тепловыделение происходит в результате ядерных трансмутаций

Таблица 2.

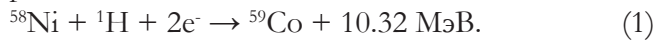
Отношение выделившегося тепла к потребленной электроэнергии (COP) в экспериментах в декабре 2014 г. и январе 2015 г.

Реактор с топливом					
Дата	Темпер °C	Длит мин	Потр Вт	Произв Вт	COP
20.12.2014	970	38	301	297	0.99
20.12.2014	1150	50	395	758	1.92
20.12.2014	1290	40	499	1365	2.74
04.01.2015	940	131	304	305	1.00
04.01.2015	1020	75	377	407	1.08
10.01.2015	1080	73	161	281	1.77
18.01.2015	800	90	308	293	0.95
18.01.2015	1080	38	78	135	1.73

Реактор без топлива					
Дата	Темпер °C	Длит мин	Потр Вт	Произв Вт	COP
02.01.2015	210	56	211	227	1.07
02.01.2015	470	88	433	414	0.95
02.01.2015	1050	16	328	1035	1.12
21.01.2015	1000	69	297	296	1.00
21.01.2015	1080	43	306	297	0.97
28.01.2015	900	65	955	105	1.08
28.01.2015	1100	66	116	116	1.00
28.01.2015	1200	50	151	147	0.97



в соответствии с законом сохранения энергии. Например, в никеле, содержащем водород, в принципе, возможно протекание ядерной реакции



Так как  $1 \text{ МДж} = 6.3 \cdot 10^{18} \text{ МэВ}$ , для выделения энергии  $1 \text{ МДж}$  в результате протекания этой реакции расходуется около  $6 \cdot 10^{17}$  ядер никеля ( $0.00006 \text{ г}$ ) и образуется столько же кобальта. Никель-водородные реакторы обычно содержат около  $1 \text{ г}$  топлива. Обнаружить  $0.00006 \text{ г}$  кобальта в  $1 \text{ г}$  никеля ( $0.006\%$ ), используя современные технологии, вполне возможно.

Сложнее обнаружить изменение соотношения изотопов. Обычные масс-спектральные анализаторы позволяют улавливать изменения соотношений изотопов в элементах порядка  $1\%$ . Обнаружить изменение порядка  $0.01\%$ , происходящее при выделении в  $1 \text{ г}$  топлива  $1 \text{ МДж}$  в результате протекания реакции (1), нереально. Для снижения содержания на  $1\%$  изотопа  $^{58}\text{Ni}$  необходима наработка избыточной энергии порядка  $100 \text{ МДж}$ .

Если топливо содержит литий, возможна ядерная реакция



В результате этой реакции в смеси изотопов лития (природная смесь содержит  $92.6\%$   $^7\text{Li}$  и  $7.4\%$   $^6\text{Li}$ ) снижается содержание  $^7\text{Li}$  и, соответственно, возрастает содержание  $^6\text{Li}$ . Предположим, что все избыточное энерговыделение связано с реакцией (2). Для выделения  $1 \text{ МДж}$  требуется  $4 \cdot 10^{17}$  ядер  $^7\text{Li}$  ( $4.2 \cdot 10^{-6} \text{ г}$ ). Типичный реактор с топливной смесью никель-алюмогидрид лития содержит около  $0.02 \text{ г}$   $^7\text{Li}$ . Поэтому при выделении  $1 \text{ МДж}$  удаляется лишь  $0.02\%$   $^7\text{Li}$ . Обнаружить такое изменение практически невозможно. При выделении  $1000 \text{ МДж}$  удаляется  $20\%$   $^7\text{Li}$ . Это приводит к возрастанию содержания  $^6\text{Li}$  с  $7.4$  до  $10\%$ . Такое изменение заметить вполне возможно, хотя и не просто из-за малой массы доступного для анализа вещества.

Таким образом, появление изотопов, отсутствующих в исходном топливе, может быть обнаружено при наработках избыточной энергии порядка  $1 \text{ МДж}$  на грамм топлива. Для надежного выявления изменений соотношений изотопов

в элементах, изначально входящих в состав топлива, требуются наработки избыточной энергии выше  $100 \text{ МДж/г}$ . Закономерно, что тщательный анализ топлива реактора GS3, созданного Аланом Голдвотером [26, 27] не обнаружил заметных изотопных изменений, так как наработка избыточной энергии в нем была около  $50 \text{ МДж/г}$ . Нарботка избыточной энергии в высокотемпературном теплогенераторе России, согласно [23], составила  $5800 \text{ МДж/г}$ . Этого вполне достаточно для радикальных изменений изотопного состава как никеля, так и лития. Далее мы изложим результаты анализа изотопных изменений в топливе и в конструкционных материалах, происшедших в нескольких никель-водородных реакторах, созданных в нашей лаборатории.

## 6. РЕАКТОР АП2

Реактор АП2 [28] был загружен топливной смесью  $640 \text{ мг Ni} + 60 \text{ мг LiAlH}_4$  (рис. 6). Он работал 16-22 марта 2015, произведя около  $150 \text{ МДж}$  избыточного тепла.

Анализы топлива до и после работы в реакторе сделаны несколькими методами в нескольких организациях. Анализ элементного состава с использованием электронного сканирующего микроскопа сделан в ИОФ РАН и ВНИИЭФ (г. Саров). В топливной смеси до загрузки в реактор уверенно различаются две фракции: кристаллы и пещеристые гранулы. В кристаллах обнаружены в основном Al, O и Cl. Гранулы состоят из никеля с небольшой примесью железа, алюминия и кислорода. В топливе после работы в реакторе видны оплавленные и шлаковидные структуры. Оплавленные структуры содержат в основном никель с примесью Fe, Al, Cr, Mn, Si, O. Шлаковидные структуры состоят в основном из Al и O.

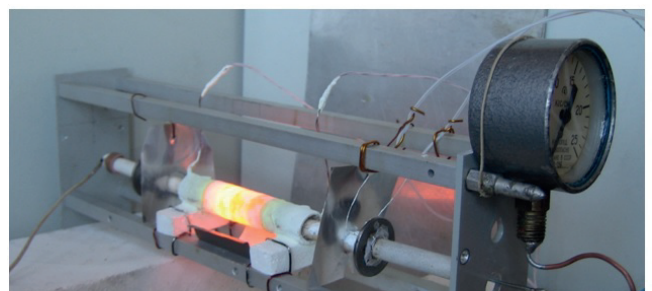


Рис. 6. Реактор АП2.

Элементный анализ с использованием лазерного атомно-эмиссионного спектрометра сделан в ИОНХ РАН. Он показал, что после работы содержание K и Sr в топливе выросло в десятки раз. Многократно увеличилось содержание Si, Na, Mg, Ca, Ti, V. Снизилось содержание Ni, Cl, Mn, Cu, Zn. Таким образом, оба метода показывают появление в топливе после пребывания в реакторе ряда элементов, которые в исходном топливе практически отсутствуют.

Следует отметить, что этот метод анализа, как и анализ с применением сканирующего электронного микроскопа, дает информацию об атомном составе лишь на поверхности исследуемого вещества. Анализ изотопного состава топлива до и после работы в реакторе АП2 методом ICP-MS, дающем информацию об изотопном составе в среднем по образцу, сделан в ГЕОХИ РАН. После работы в реакторе сильно снизилось общее содержание алюминия и лития, причем немного возросло относительное содержание <sup>6</sup>Li. Но это увеличение (на 0.5%) лежит в пределах возможной ошибки измерения. Достоверных изменений изотопного состава никеля не обнаружено.

Анализ топлива реактора АП2 методом ICP-MS был сделан также в университете Uppsala (Швеция). Результаты этих измерений показаны в **Таблице 3**.

По данным этих измерений, относительное содержание <sup>6</sup>Li в образце отработавшего топлива возросло более чем в 2 раза. Вполне заметные изменения произошли и в соотношении изотопов никеля. Эти результаты отличаются от результатов, полученных в ГЕОХИ РАН. Различие, возможно, связано с неравномерностью изменений по объему образца. Следует заметить, что достоверные результаты для лития получить сложно из-за очень малой концентрации лития в отработавшем топливе (<0.01%).

**Таблица 3.**

Соотношение изотопов лития и никеля в топливе реактора АП2, определенное методом ICP-MS в университете Uppsala (Швеция).

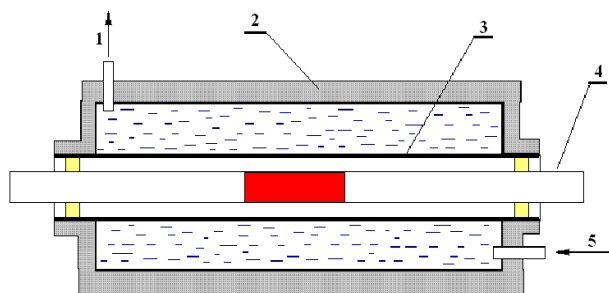
%	<sup>6</sup> Li	<sup>7</sup> Li	<sup>58</sup> Ni	<sup>60</sup> Ni	<sup>61</sup> Ni	<sup>62</sup> Ni	<sup>64</sup> Ni
До	7.4	92.6	68.1	26.2	1.14	3.63	0.93
После	15.4	84.6	63.4	27.6	1.3	5.2	2.5
Природа	7.6	92.4	68.0	26.2	1.14	3.71	0.93

## 7. ТЕПЛОГЕНЕРАТОР С ПРОТОЧНЫМ КАЛОРИМЕТРОМ ("ПРОТОК-6")

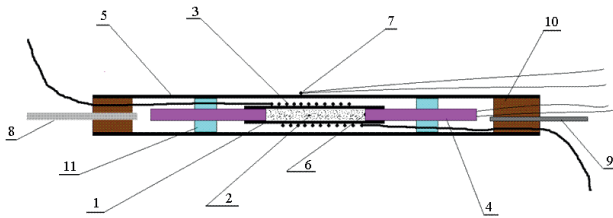
Надежное измерение выделяющегося тепла является важнейшей задачей при создании устройств, доказывающих наличие избыточного тепловыделения. Методика с проточной водой считается наиболее точной, поэтому проточный калориметр мы использовали для измерения тепловыделения в двенадцати реакторах. В данной статье описан один из них [29], который проработал больше месяца (**рис. 7**).

В использованном нами проточном калориметре выделяемое тепло поглощается водой, омывающей медную трубу, окружающую реактор. Мощность тепловыделения определяется по формуле  $W = c(dm/dt)(T-T_0)(1+\alpha)$ , где  $c$  – удельная теплоемкость воды,  $(dm/dt)$  – масса воды, протекающей в секунду,  $\alpha$  – поправка на потери тепла,  $T_0$  – температура на входе в калориметр,  $T$  – температура на выходе.

На **рис. 8** показана конструкция реактора. Топливо (1.8 г порошка никеля ПНК-ОТ2, смешанного с 0.2 г алюмогибрида лития) находится в керамической трубке длиной 80 мм внешним диаметром 7.5 мм и внутренним диаметром 5 мм. На трубку навита спираль из вольфрамового провода диаметром 0.5 мм. В трубку вставлены керамические стержни, которые при помощи центрирующих шайб удерживают внутреннюю трубку в середине реактора. В продольных отверстиях одного из стержней находится провода высокотемпературной термопары (типа ТВР), измеряющей температуру торца топлива. Другая термопара (типа К) контролирует температуру наружной поверхности внешней керамической трубки. Эта трубка имеет наружный диаметр 18 мм и внутренний 14 мм. Благодаря большой длине внешней трубки (350 мм) и



**Рис. 7.** Устройство проточного калориметра: 1 – вытекающая вода, 2 – теплоизоляция, 3 – медная труба, 4 – реактор, 5 – втекающая вода.



**Рис. 8.** Конструкция реактора. 1 – внутренняя керамическая трубка, 2 – топливо, 3 – нагреватель, 4 – керамические стержни, 5 – внешняя керамическая трубка, 6 – внутренняя термопара, 7 – наружная термопара, 8 – трубка для подключения манометра, 9 – трубка для откачки воздуха, 10 – герметик, 11 – центрирующие шайбы.

низкой теплопроводности керамики, во время работы реактора температура ее концов не превышает 50°C, что позволяет для герметизации использовать эпоксидный компаунд. Из торцов реактора, помимо проводов нагревателя, выходят металлическая трубка для подключения манометра и стеклянная трубка для откачки воздуха.

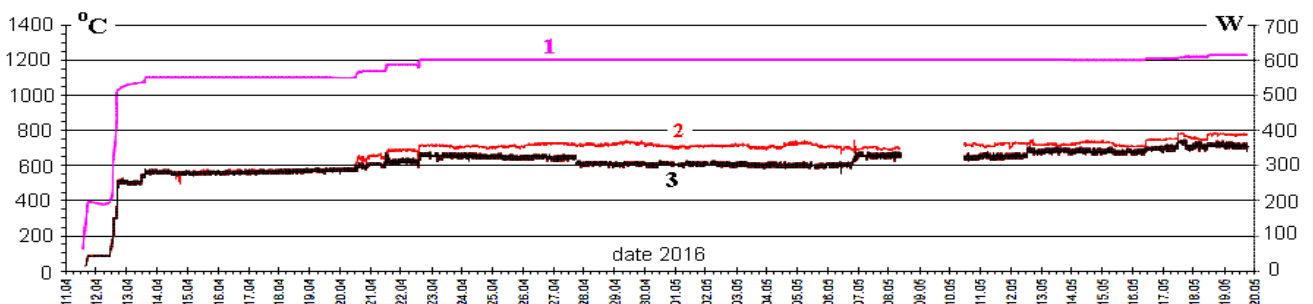
Электропитание реактора осуществлялось от вторичной обмотки трансформатора мощностью 630 Вт. Переключатель отводов вторичной обмотки позволяет задавать нужную мощность нагрева. Термопара, измеряющая температуру торца топлива, подключена к терморегулятору ТРМ-500, который держит электронагреватель включенным, пока температура не достигает заданной величины, и отключает его при превышении заданной температуры. Мощность нагрева измеряется вольтметром и амперметром непосредственно на нагревателе, а также ваттметром, установленным на входе трансформатора. Сопоставление мощности на нагревателе с мощностью на первичной обмотке позволяет определить потери в трансформаторе и проводах. Это необходимо для внесения поправки в результаты измерений расхода электроэнергии по импульсам с электросчетчика, регистрируемым

компьютером. Помимо расхода электроэнергии, компьютер регистрирует температуры на входе и выходе калориметра, а также информацию о расходе воды, поступающую с расходомера.

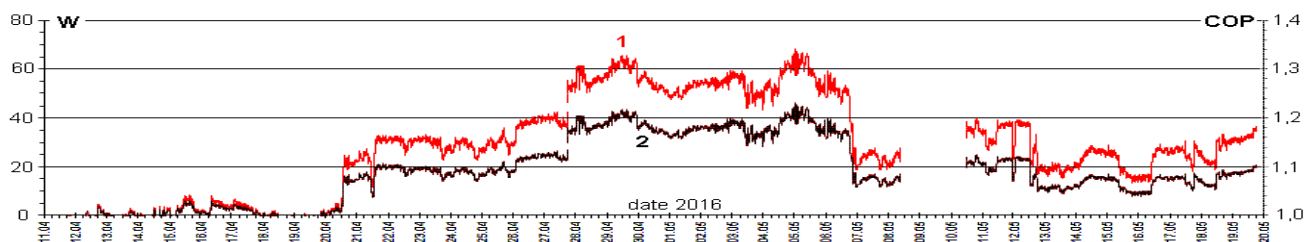
Для проверки работоспособности установки было использовано устройство, подобное вышеописанному реактору, но не содержащее топлива. Эти измерения показали, что отклонение данных калориметра от результатов измерения электрической мощности не превышает 3%.

На подготовительном этапе из реактора, нагретого до 120°C, форвакуумным насосом был откачан воздух с целью удаления остатков воды и других летучих загрязнений. После этого вакуумированный реактор был отсоединен от вакуумного насоса путем расплавления пламенем газовой горелки стеклянной трубки, соединяющей реактор с вакуумным насосом. Далее, в результате нагрева внутренней трубки до температуры 180-200°C, произошло разложение алюмогидрида лития, и реактор наполнился водородом до давления 4.25 бар. После этого температура была увеличена до 400°C и удерживалась на этом уровне около 20 часов. За это время давление снизилось до 4.0 бар. Путем открытия клапана, расположенного на трубке, соединяющей реактор с манометром, давление было снижено до 0.4 бар. В процессе постепенного повышения температуры после небольшого возрастания давления при температуре 1100°C, несмотря на дальнейшее увеличение температуры, давление начало падать и на четырнадцатые сутки от начала эксперимента стало ниже атмосферного.

На рис. 9 показано, как менялись на протяжении 38 суток от начала до конца эксперимента мощность электронагрева, температура на торце топлива и мощность тепловыделения, измеряемая калориметром.



**Рис. 9.** Изменение температуры (1), мощности тепловыделения (2) и потребления электроэнергии (3) в процессе работы реактора.



**Рис. 10.** Изменение избыточной мощности (1) и отношения мощности выделенного тепла к мощности, потребляемой электронагревателем COP (2).

Видно, что при температурах до 1100°C мощность тепловыделения, измеренная калориметром, практически равна мощности, выделяемой электронагревателем. Начиная с температуры 1150°C, мощность тепловыделения заметно выше мощности электронагревателя. Ход разности между мощностью тепловыделения (избыточной мощностью) и мощностью потребленной электроэнергии показан на рис. 10. Там же показано, как менялось на протяжении эксперимента отношение мощности выделенного тепла к мощности, потребляемой электронагревателем (COP).

Видно, что появление избыточной мощности около 30 Вт, существенно превышающей возможную ошибку измерений, произошло после достижения температуры 1150°C. Примерно такая избыточная мощность выделялась вначале и при повышении температуры до 1200°C. Но через 5 суток без внешнего вмешательства произошло резкое повышение избыточной мощности до 50-60 Вт. Через 9 суток после этого произошло столь же резкое снижение до 20-30 Вт. В последнюю неделю наблюдались колебания избыточной мощности в пределах 15-30 Вт с периодом около 2 суток. Постепенное увеличение температуры до 1230°C привело к росту избыточной мощности до 35 Вт, однако работа в таком режиме через сутки привела к выходу реактора из строя в результате перегорания электронагревателя. Всего за время эксперимента выделилось около 100 МДж избыточной тепловой энергии.

В соответствии с изменениями избыточной мощности менялась величина COP в пределах

от 1.0 до 1.2. Более детальное описание этого эксперимента приведено в статье [28].

После окончания эксперимента реактор был вскрыт (рис. 11). Было обнаружено, что внутренняя поверхность внешней трубки вблизи нагревателя покрылась серым бугристым стекловидным налетом. Внешний вид внутренней трубки и обмотки нагревателя сохранился. Но внутри произошли значительные изменения: образовалась стекловидная масса с вкраплениями металлических шариков размером около 0.1 мм. Несколько шариков имели диаметр до 1 мм. На концах засыпки топливо приобрело вид спекшейся массы, содержащей мелкие металлические шарики. Кроме того, из внутренней трубки высыпался порошок. При помощи магнита из этого порошка была извлечена фракция, состоящая из нитей поперечным размером около 0.1 мм длиной до 5 мм.

Несколько образцов были подвергнуты масс-спектроскопическому анализу в ГЕОХИ РАН методом ICP-MS. Были исследованы: исходная топливная смесь, металлический шарик из отработавшего топлива, топливо на краю активной зоны, вещество, накопившееся между внутренней и наружной трубками, налет на внутренней поверхности наружной трубки. Ввиду большого объема полученной информации нет возможности представить ее полностью. Частично результаты анализа показаны в



**Рис. 11.** Реактор «Проток б» после вскрытия.

Таблица 4.

Относительное содержание изотопов (атомные %) в топливе и около активной зоны реактора «Проток-6» до и после работы реактора. Показаны изотопы с содержанием >0.1%.

До работы в реакторе						После работы в реакторе							
Топливо исходное		Керамика		W провод		Металлическая капля в отработавшем топливе		Налет на внутренней поверхности наружной керамической трубки		Вещество, накопившееся между внутренней и наружной трубками			
<sup>7</sup> Li	0.74	<sup>23</sup> Na	7.01	<sup>23</sup> Na	5.37	<sup>11</sup> Ba	0.19	<sup>23</sup> Na	1.56	<sup>11</sup> B	0.44	<sup>75</sup> As	0.43
<sup>23</sup> Na	1.90	<sup>24</sup> Mg	1.61	<sup>24</sup> Mg	0.24	<sup>23</sup> Na	5.07	<sup>24</sup> Mg	1.16	<sup>23</sup> Na	14.70	<sup>76</sup> Ge, Se	0.16
<sup>24</sup> Mg	0.12	<sup>25</sup> Mg	0.23	<sup>27</sup> Al	0.31	<sup>24</sup> Mg	0.21	<sup>25</sup> Mg	0.16	<sup>24</sup> Mg	0.82	<sup>77</sup> Se	0.17
<sup>27</sup> Al	3.63	<sup>26</sup> Mg	0.28	<sup>29</sup> Si	1.88	<sup>27</sup> Al	0.22	<sup>26</sup> Mg	0.17	<sup>26</sup> Mg	0.15	<sup>79</sup> Br	0.97
<sup>29</sup> Si	1.04	<sup>27</sup> Al	65.05	<sup>31</sup> P	0.18	<sup>29</sup> Si	3.94	<sup>27</sup> Al	0.23	<sup>27</sup> Al	0.92	<sup>81</sup> Br	1.03
<sup>39</sup> K	1.60	<sup>29</sup> Si	1.55	<sup>39</sup> K	6.09	<sup>31</sup> P	0.14	<sup>29</sup> Si	0.77	<sup>29</sup> Si	9.37	<sup>90</sup> Zr	0.16
<sup>44</sup> Ca	0.28	<sup>31</sup> P	0.16	<sup>44</sup> Ca	1.06	<sup>39</sup> K	3.51	<sup>39</sup> K	0.86	<sup>31</sup> P	0.32	<sup>116</sup> In, Sn	0.26
<sup>45</sup> Sc	0.22	<sup>39</sup> K	8.36	<sup>45</sup> Sc	0.80	<sup>43</sup> Ca	0.14	<sup>44</sup> Ca	0.71	<sup>39</sup> K	9.89	<sup>120</sup> Sn, Te	0.12
<sup>51</sup> V	0.68	<sup>44</sup> Ca	0.94	<sup>54</sup> Cr	0.40	<sup>44</sup> Ca	1.08	<sup>45</sup> Sc	0.24	<sup>43</sup> Ca	0.35	<sup>127</sup> I	0.15
<sup>53</sup> Cr	0.22	<sup>45</sup> Sc	0.61	<sup>56</sup> Fe	10.46	<sup>45</sup> Sc	0.91	<sup>51</sup> V	0.10	<sup>44</sup> Ca	2.15	<sup>138</sup> Ba, La, Ce	0.36
<sup>55</sup> Mn	0.17	<sup>48</sup> Ti, Ca	0.15	<sup>182</sup> W	18.50	<sup>51</sup> V	1.56	<sup>52</sup> Cr	0.57	<sup>45</sup> Sc	1.95	<sup>140</sup> Ce	6.54
<sup>56</sup> Fe	0.99	<sup>54</sup> Cr	0.41	<sup>183</sup> W	9.52	<sup>52</sup> Cr	0.14	<sup>53</sup> Cr	0.10	<sup>48</sup> Ti, Ca	0.13	<sup>142</sup> Ce, Nd	0.85
<sup>58</sup> Fe, Ni	65.91	<sup>56</sup> Fe	10.00	<sup>184</sup> W	21.48	<sup>53</sup> Cr	0.51	<sup>54</sup> Cr	1.17	<sup>51</sup> V	6.08	<sup>182</sup> W	3.50
<sup>60</sup> Ni	23.58	<sup>58</sup> Fe, Ni	0.15	<sup>186</sup> W, Os	21.29	<sup>54</sup> Cr	0.46	<sup>56</sup> Fe	19.10	<sup>52</sup> Cr	0.48	<sup>183</sup> W	1.77
<sup>61</sup> Ni	1.10	<sup>89</sup> Y	0.25	<sup>200</sup> Hg	0.20	<sup>55</sup> Mn	0.14	<sup>57</sup> Fe	0.45	<sup>53</sup> Cr	2.07	<sup>184</sup> W, Os	4.09
<sup>62</sup> Ni	3.63	<sup>90</sup> Zr	0.44	<sup>202</sup> Hg	0.21	<sup>56</sup> Fe	7.36	<sup>58</sup> Fe, Ni	32.31	<sup>54</sup> Cr	0.61	<sup>186</sup> W, Os	3.82
<sup>64</sup> Ni, Zn	1.24	<sup>92</sup> Sr, Mo	0.16	<sup>198</sup> Hg	0.21	<sup>57</sup> Fe	0.18	<sup>59</sup> Co	0.40	<sup>55</sup> Mn	0.28	<sup>206</sup> Pb	0.21
<sup>66</sup> Zn	0.16	<sup>94</sup> Sr, Mo	0.16			<sup>58</sup> Fe, Ni	45.07	<sup>60</sup> Ni	13.93	<sup>56</sup> Fe	6.48	<sup>207</sup> Pb	0.19
<sup>68</sup> Zn	0.12	<sup>138</sup> Ba, Ce	0.33			<sup>59</sup> Co	19.81	<sup>61</sup> Ni	0.68	<sup>57</sup> Fe	0.18	<sup>208</sup> Pb	0.49
<sup>79</sup> Br	0.13	<sup>206</sup> Pb	0.13			<sup>60</sup> Ni	0.86	<sup>62</sup> Ni	2.10	<sup>58</sup> Fe, Ni	8.25		
<sup>81</sup> Br	0.12	<sup>208</sup> Pb	0.29			<sup>61</sup> Ni	2.97	<sup>64</sup> Ni, Zn	5.06	<sup>60</sup> Ni	3.30		
<sup>138</sup> BaLaCe	0.25					<sup>62</sup> Ni	0.14	<sup>66</sup> Zn	2.88	<sup>61</sup> Ni	0.15		
<sup>206</sup> Pb	0.32					<sup>64</sup> Ni, Zn	1.62	<sup>67</sup> Zn	0.47	<sup>62</sup> Ni	0.54		
<sup>207</sup> Pb	0.25					<sup>66</sup> Zn	0.52	<sup>68</sup> Zn	2.02	<sup>63</sup> Cu	0.17		
<sup>208</sup> Pb	0.69					<sup>68</sup> Zn	0.40	<sup>88</sup> Sr	0.11	<sup>64</sup> Ni, Zn	1.48		
						<sup>75</sup> As	0.15	<sup>115</sup> In, Sc	0.13	<sup>66</sup> Zn	0.81		
						<sup>79</sup> Br	0.35	<sup>140</sup> Ce	0.37	<sup>67</sup> Zn	0.15		
						<sup>81</sup> Br	0.36	<sup>182</sup> W	2.81	<sup>68</sup> Zn	0.63		
						<sup>138</sup> Ba,La,Ce	0.14	<sup>183</sup> W	1.54				
						<sup>184</sup> W, Os	0.12	<sup>184</sup> W, Os	3.52				
						<sup>208</sup> Pb	0.17	<sup>186</sup> W, Os	3.24				

таблице 4. В ней, помимо данных для образцов, извлеченных из реактора после его работы, дана информация о содержании изотопов в топливе, а также в керамике и вольфрамовом проводе до работы в реакторе. Эта информация важна, так как появление новых элементов может быть связано не с трансмутациями, а с миграцией из конструкционных материалов, вполне возможной при высоких температурах. К сожалению, метод ICP-MS не позволяет определять содержание изотопов с массами 1-5, 12-22, 32, в том числе, изотопы углерода, кислорода, азота, фтора, серы.

Очевидным результатом является возрастание содержания многих нуклидов по сравнению с их содержанием в исходном топливе и конструкционных материалах. Исключением является литий (снижение примерно в 100 раз) и алюминий в топливе (снижение больше чем в 10 раз). Отметим особенно сильное возрастание присутствия бора, железа, галлия, церия, циркония, стронция, висмута. Наиболее значительные аномалии обнаружены в порошке, накопившемся в пространстве между внутренней и наружными трубками. Особенно много появилось <sup>140</sup>Ce: 6.3%

**Таблица 5.**  
Соотношение изотопов никеля в топливе и около активной зоны реактора «Проток-6» до и после работы реактора.

%	<sup>58</sup> Ni	<sup>60</sup> Ni	<sup>61</sup> Ni	<sup>62</sup> Ni	<sup>64</sup> Ni
Топливо исходное	65.78	27.74	1.29	4.28	0.91
Металлическая капля	65.00	28.57	1.24	4.29	0.91
Топливо на краю	65.58	27.88	1.27	4.36	0.91
Налет на керамике	65.32	28.16	1.37	4.24	0.91
Порошок между трубками	66.74	26.71	1.23	4.41	0.91
Природное соотношение	68.27	26.1	1.13	3.59	0.91

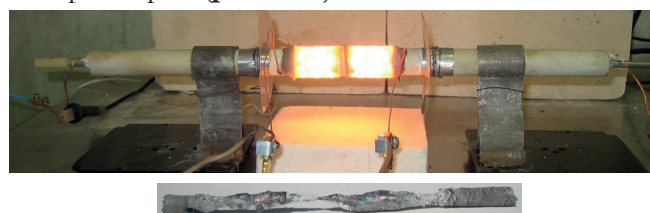
(в исходном топливе <0.0001%). Значительное количество вольфрама, обнаруженное в образцах после пребывания в реакторе, вероятно, связано с миграцией этого элемента из раскаленной вольфрамовой спирали.

Большой интерес представляет исследование возможных изменений изотопного состава лития и никеля. К сожалению, очень низкое содержание лития в образцах после пребывания в работающем реакторе не позволило сделать надежные измерения. Результаты, полученные для никеля, представлены в **таблице 5**. Так как данные по <sup>64</sup>Ni ненадежны из-за неконтролируемой добавки <sup>64</sup>Zn, при составлении таблицы для доли <sup>64</sup>Ni было принято значение из справочника [30]. Так как эта доля мала, такое допущение может изменить доли остальных изотопов лишь незначительно.

Видно, что данные по разным исследованным образцам несколько отличаются от природного соотношения [30], но между собой различаются незначительно. Заметного увеличения доли <sup>62</sup>Ni за счет снижения доли остальных изотопов, обнаруженного в эксперименте в Лугано [23, 24], нет ни в одном из исследованных образцов. Возможно, что незаметность эффекта связана с тем, что наработка избыточной энергии в Лугано была в 60 раз больше, чем в описываемом реакторе.

**8. РЕАКТОР ВВЗ**

Реактор ВВЗ отличается от реактора "Проток 6" иной конструкцией нагревателя и отсутствием калориметра (**рис. 12**). В качестве топлива



**Рис. 12.** Реактор ВВЗ и извлеченное из него отработавшее топливо.

была использована смесь порошка никеля с алюмогидридом лития массой 1.5 г. В топливе находились кусочки вольфрамового провода общей массой 0.77 г. Реактор работал с 14 июня до 24 июля 2016 г., производя избыточную мощность до 330 Вт. Всего выработано 790 МДж избыточного тепла.

После окончания работы реактора из него было извлечено отработавшее топливо, имевшее вид каплевидного слитка. В ГЕОХИ РАН был сделан его анализ методом ICP-MS, причем отдельно делались анализы поверхностного и более глубокого слоев. Частично результаты анализа показаны в **таблице 6**. В ней, помимо **Таблица 6.**

Содержание нуклидов (атомные %) в топливе реактора «ВВЗ» до и после работы реактора. Показаны изотопы с содержанием > 0,1%.

Топливо в реакторе ВВЗ							
До работы в реакторе		После работы в реакторе					
Топливо исходное		Поверхность		Поверхность		Более глубокое растворение	
<sup>23</sup> Na	2.61	<sup>10</sup> B	0.15	<sup>75</sup> As	0.17	<sup>10</sup> B	0.14
<sup>24</sup> Mg	0.15	<sup>11</sup> B	0.67	<sup>79</sup> Br	0.11	<sup>11</sup> B	0.66
<sup>27</sup> Al	2.93	<sup>24</sup> Mg	1.50	<sup>81</sup> Br	0.21	<sup>23</sup> Na	3.72
<sup>28</sup> Si	1.22	<sup>25</sup> Mg	0.12	<sup>88</sup> Sr	0.23	<sup>27</sup> Al	1.02
<sup>39</sup> K	2.52	<sup>26</sup> Mg	0.27	<sup>90</sup> Zr	0.20	<sup>28</sup> Si	0.25
<sup>44</sup> Ca	0.44	<sup>27</sup> Al	1.14	<sup>107</sup> Ag	1.13	<sup>51</sup> V	2.14
<sup>45</sup> Sc	0.34	<sup>28</sup> Si	0.54	<sup>109</sup> Ag	2.01	<sup>52</sup> Cr	0.30
<sup>51</sup> V	0.55	<sup>44</sup> Ca	0.16	<sup>127</sup> I	0.43	<sup>53</sup> Cr	0.73
<sup>52</sup> Cr	0.18	<sup>45</sup> Sc	0.18	<sup>140</sup> Ce	0.72	<sup>54</sup> Cr	0.21
<sup>55</sup> Mn	0.14	<sup>51</sup> V	2.41	<sup>182</sup> W	3.34	<sup>56</sup> Fe	2.55
<sup>56</sup> Fe	2.92	<sup>52</sup> Cr	0.31	<sup>183</sup> W	1.61	<sup>58</sup> Fe, Ni	44.47
<sup>58</sup> Fe, Ni	45.09	<sup>53</sup> Cr	0.81	<sup>184</sup> W, Os	3.39	<sup>60</sup> Ni	18.23
<sup>60</sup> Ni	19.01	<sup>56</sup> Fe	0.42	<sup>185</sup> Re	0.26	<sup>61</sup> Ni	0.87
<sup>61</sup> Ni	0.88	<sup>58</sup> Fe, Ni	46.08	<sup>186</sup> W, Os	2.91	<sup>62</sup> Ni	2.83
<sup>62</sup> Ni	2.93	<sup>60</sup> Ni	19.34	<sup>187</sup> Re, Os	0.60	<sup>64</sup> Ni, Zn	0.87
<sup>64</sup> Ni, Zn	1.00	<sup>61</sup> Ni	0.96	<sup>206</sup> Pb	0.18	<sup>75</sup> As	0.12
<sup>66</sup> Zn	0.13	<sup>62</sup> Ni	3.02	<sup>207</sup> Pb	0.13	<sup>79</sup> Br	0.19
<sup>68</sup> Zn	0.10	<sup>63</sup> Cu	0.39	<sup>208</sup> Pb	0.34	<sup>81</sup> Br	0.19
<sup>79</sup> Br	0.10	<sup>64</sup> Ni, Zn	1.31			<sup>90</sup> Zr	0.39
<sup>7</sup> Li	0.60	<sup>65</sup> Cu	0.16			<sup>92</sup> Sr, Mo	0.14
<sup>81</sup> Br	0.10	<sup>66</sup> Zn	0.37			<sup>94</sup> Sr, Mo	0.16
<sup>138</sup> Ba, La, Ce	0.20	<sup>68</sup> Zn	0.20			<sup>107</sup> Ag	1.37
<sup>182</sup> W	3.73					<sup>109</sup> Ag	1.39
<sup>183</sup> W	1.92					<sup>140</sup> Ce	0.78
<sup>184</sup> W	4.33					<sup>142</sup> Ce, Nd	0.10
<sup>186</sup> W, Os	4.29					<sup>182</sup> W	3.49
<sup>206</sup> Pb	0.26					<sup>183</sup> W	1.90
<sup>207</sup> Pb	0.50					<sup>184</sup> W, Os	4.17
<sup>208</sup> Pb	0.56					<sup>185</sup> Re	0.38
						<sup>186</sup> W, Os	3.72
						<sup>187</sup> Re, Os	0.60
						<sup>208</sup> Pb	0.17

Таблица 7.

Соотношение изотопов никеля в топливе ВВЗ до и после работы реактора.

%	<sup>58</sup> Ni	<sup>60</sup> Ni	<sup>61</sup> Ni	<sup>62</sup> Ni	<sup>64</sup> Ni
Исходное топливо	65.93	27.98	1.19	3.98	0.91
Поверхность топлива	65.79	27.61	1.37	4.31	0.91
Глубокое растворение	66.36	27.20	1.29	4.23	0.91
Природа	68.27	26.10	1.13	3.59	0.91

данных для образцов, извлеченных из реактора после его работы, дана информация о содержании изотопов в исходном топливе, включая внедренные в него вольфрамовые проволочки.

Видно, что изотопный состав топлива в результате пребывания в реакторе заметно изменился. Особенно сильно возросло содержание бора, меди, церия, серебра.

Так же, как и в вышеописанных реакторах, данные по исследованным образцам, хотя и несколько отличаются от природного соотношения, между собой различаются незначительно (таблица 7).

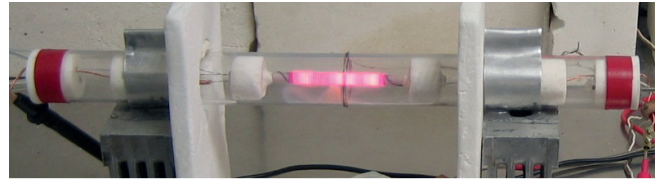


Рис. 13. Реактор KV3 в начале работы.

### 9. РЕАКТОР KV3

Реактор KV3 (рис. 13) работал с 20 декабря 2016 г до 31 января 2017 г. с избыточной мощностью 100-200 Вт. Интегральная наработка избыточного тепловыделения около 400 МДж. Главное отличие его от предшествующих реакторов заключалось в том, что он был загружен порошком никеля массой 1.8 г без примеси алюмогидрида лития. Насыщение водородом осуществлялось путем выдерживания в газообразном водороде. Кроме того, в отличие от вышеописанных реакторов, он имел не керамическую, а кварцевую внешнюю трубу. Нагреватель был сделан не из чистого вольфрама, а из сплава вольфрам-рений.

Методом ICP-MS в ГЕОХИ РАН были исследованы: топливо и конструкционные

Таблица 8.

Содержание нуклидов (атомные %) в топливе и около активной зоны реактора KV3 до и после работы реактора. Показаны изотопы с содержанием >0.1%.

До работы в реакторе					
Топливо исходное		Керамика		Провод нагревателя	
<sup>23</sup> Na	0.33	<sup>27</sup> Al	88.15	<sup>23</sup> Na	0.47
<sup>39</sup> K	0.38	<sup>23</sup> Na	1.98	<sup>29</sup> Si	0.27
<sup>56</sup> Fe	0.45	<sup>24</sup> Mg	0.82	<sup>39</sup> K	0.40
<sup>58</sup> Fe, Ni	64.49	<sup>25</sup> Mg	0.12	<sup>44</sup> Ca	0.12
<sup>60</sup> Ni	27.63	<sup>26</sup> Mg	0.14	<sup>56</sup> Fe	0.21
<sup>61</sup> Ni	1.18	<sup>29</sup> Si	0.37	<sup>58</sup> Fe, Ni	0.12
<sup>62</sup> Ni	3.88	<sup>39</sup> K	2.10	<sup>182</sup> W	20.24
<sup>64</sup> Ni, Zn	1.21	<sup>44</sup> Ca	0.21	<sup>183</sup> W	11.02
		<sup>47</sup> Ti	0.88	<sup>184</sup> W, Os	24.39
		<sup>48</sup> Ti, Ca	0.18	<sup>185</sup> Re	6.97
		<sup>54</sup> Cr	0.14	<sup>186</sup> W, Os	22.23
		<sup>56</sup> Fe	3.17	<sup>187</sup> Re, Os	11.85
		<sup>58</sup> Fe, Ni	0.28	<sup>198</sup> Hg, Pt	0.12
		<sup>60</sup> Ni	0.11	<sup>200</sup> Hg	0.14
		<sup>89</sup> Y	0.13	<sup>202</sup> Hg	0.13
		<sup>138</sup> Ba, Ce	0.17	<sup>208</sup> Pb	0.18

После работы в реакторе						Вещество, накопившееся между внутренней и наружной трубками	
Отработавшее топливо							
Центральная зона		Керамика		Керамика			
<sup>23</sup> Na	0.13	<sup>11</sup> B	0.13	<sup>64</sup> Ni, Zn	0.22	<sup>23</sup> Na	5.53
<sup>31</sup> P	0.11	<sup>23</sup> Na	15.61	<sup>66</sup> Zn	0.11	<sup>24</sup> Mg	0.50
<sup>39</sup> K	0.14	<sup>24</sup> Mg	1.06	<sup>76</sup> Ge, Se	0.20	<sup>27</sup> Al	0.32
<sup>56</sup> Fe	0.23	<sup>25</sup> Mg	0.13	<sup>88</sup> Sr	0.21	<sup>29</sup> Si	1.42
<sup>58</sup> Fe, Ni	65.39	<sup>26</sup> Mg	0.24	<sup>89</sup> Y	0.22	<sup>31</sup> P	0.16
<sup>60</sup> Ni	26.15	<sup>27</sup> Al	6.05	<sup>90</sup> Zr	0.42	<sup>39</sup> K	6.93
<sup>61</sup> Ni	1.18	<sup>29</sup> Si	4.26	<sup>92</sup> Sr, Mo	0.22	<sup>44</sup> Ca	0.88
<sup>62</sup> Ni	3.99	<sup>39</sup> K	15.26	<sup>94</sup> Sr, Mo	0.17	<sup>46</sup> Sc	0.82
<sup>63</sup> Cu	0.84	<sup>43</sup> Ca	0.26	<sup>109</sup> Ag	0.10	<sup>54</sup> Cr	0.26
<sup>64</sup> Ni, Zn	1.14	<sup>44</sup> Ca	3.15	<sup>127</sup> I	0.16	<sup>56</sup> Fe	7.04
<sup>65</sup> Cu	0.42	<sup>45</sup> Sc	2.04	<sup>138</sup> Ba, Ce	0.39	<sup>58</sup> Fe, Ni	1.80
		<sup>46</sup> Ti, Ca	0.23	<sup>182</sup> W	4.32	<sup>60</sup> Ni	0.74
		<sup>51</sup> V	0.22	<sup>183</sup> W	2.35	<sup>62</sup> Ni	0.10
		<sup>54</sup> Cr	0.96	<sup>184</sup> W	5.01	<sup>63</sup> Cu	0.13
		<sup>55</sup> Mn	0.10	<sup>185</sup> Re	5.95	<sup>64</sup> Ni, Zn	0.15
		<sup>56</sup> Fe	21.14	<sup>186</sup> W, Os	4.77	<sup>182</sup> W	18.29
		<sup>57</sup> Fe	0.15	<sup>203</sup> Tl	0.15	<sup>183</sup> W	10.44
		<sup>58</sup> Fe, Ni	0.91	<sup>206</sup> Pb	0.15	<sup>184</sup> W	21.36
		<sup>60</sup> Ni	0.37	<sup>207</sup> Pb	0.15	<sup>186</sup> W, Os	20.90
		<sup>63</sup> Cu	0.14	<sup>208</sup> Pb	0.40	<sup>198</sup> Hg	0.17
						<sup>200</sup> Hg	0.20
						<sup>202</sup> Hg	0.18
						<sup>208</sup> Pb	0.15

материалы до работы в реакторе, а также топливо в центральной зоне и вблизи края, порошок из пространства между внутренней и внешней трубками, конструкционные материалы после работы в реакторе. Полученные результаты частично показаны в **таблице 8**.

Так же, как в реакторах "Проток 6" и ВВЗ, в пространстве между внутренней и наружной трубками появилось много вольфрама. Помимо вольфрама, здесь накопилось много железа, натрия, калия, никеля, кремния, кальция, скандия и ряда других элементов.

Сравнивая топливо до и после работы в реакторе, можно заметить снижение содержания натрия, калия и железа. Обращает на себя внимание появление значительного количества меди.

Очень много вольфрама и рения появилось в керамической трубке, обвитой нагревателем, в которой находилось топливо. В **таблице 9** представлены нуклиды, относительное содержание которых в керамической трубке возросло более чем в 10 раз.

**Таблица 9.**

Относительное содержание нуклидов (атомные %) в керамической трубке до и после работы реактора КВЗ. Показаны нуклиды, содержание которых возросло более чем в 10 раз.

	До	После	После/До		До	После	После/До
<sup>10</sup> B	0.0008	0.0318	41.8	<sup>114</sup> Cd, Sn	0.0005	0.0064	11.9
<sup>11</sup> B	0.0054	0.1277	23.4	<sup>116</sup> Cd, Sn	0.0022	0.0275	12.8
<sup>28</sup> Si	0.3709	4.2603	11.5	<sup>117</sup> Sn	0.0011	0.0129	12.0
<sup>43</sup> Ca	0.0158	0.2638	16.7	<sup>118</sup> Sn	0.0024	0.0422	17.9
<sup>44</sup> Ca	0.2123	3.1461	14.8	<sup>119</sup> Sn	0.0014	0.0165	11.7
<sup>45</sup> Sc	0.0507	2.0384	40.2	<sup>120</sup> Sn, Te	0.0034	0.0670	19.5
<sup>46</sup> Ti, Ca	0.0074	0.0836	11.3	<sup>122</sup> Te	0.0007	0.0101	15.0
<sup>51</sup> V	0.0028	0.2151	78.0	<sup>127</sup> I	0.0062	0.1589	25.7
<sup>58</sup> Cr	0.0057	0.0753	13.3	<sup>128</sup> Te	0.0002	0.0046	22.8
<sup>64</sup> Ni, Zn	0.0186	0.2224	12.0	<sup>124</sup> Te	0.0008	0.0092	11.4
<sup>66</sup> Zn	0.0099	0.1102	11.1	<sup>130</sup> Te	0.0006	0.0101	16.7
<sup>67</sup> Zn	0.0014	0.0211	15.0	<sup>182</sup> W	0.0076	4.3168	567.8
<sup>68</sup> Zn	0.0080	0.0808	10.1	<sup>183</sup> W	0.0035	2.3489	671.7
<sup>72</sup> Ge	0.0001	0.0037	27.2	<sup>184</sup> W	0.0076	5.0087	658.8
<sup>75</sup> As	0.0001	0.0138	102.2	<sup>185</sup> Re	0.0006	5.9469	9827.0
<sup>76</sup> Ge, Se	0.0115	0.1976	17.2	<sup>186</sup> W, Os	0.0089	4.7748	537.6
<sup>77</sup> Se	0.0001	0.0055	82.2	<sup>198</sup> Hg	0.0001	0.0321	238.5
<sup>78</sup> Se, Kr	0.0028	0.0542	19.7	<sup>199</sup> Hg	0.0007	0.0248	33.5
<sup>79</sup> Br	0.0028	0.0560	20.3	<sup>200</sup> Hg	0.0004	0.0560	138.9
<sup>81</sup> Br	0.0040	0.0790	19.6	<sup>202</sup> Hg	0.0005	0.0606	128.8
<sup>83</sup> Kr	0.0001	0.0009	13.7	<sup>203</sup> Tl	0.0015	0.1498	101.2
<sup>107</sup> Ag	0.0067	0.0863	13.0	<sup>204</sup> Pb, Hg	0.0010	0.0101	10.0
<sup>109</sup> Ag	0.0071	0.1020	14.3				
<sup>113</sup> Cd, In	0.0001	0.0009	13.7				

**Таблица 10.**

Соотношение изотопов никеля в топливе и около активной зоны реактора КВЗ до и после работы реактора.

%	<sup>58</sup> Ni	<sup>60</sup> Ni	<sup>61</sup> Ni	<sup>62</sup> Ni	<sup>64</sup> Ni
Исходное топливо	65.93	27.98	1.19	3.98	0.91
Отработавшее топливо	65.74	28.17	1.20	3.98	0.91
Вещество между трубками	66.66	27.33	1.30	3.79	0.91
Керамика	67.65	27.37	0.82	3.26	0.91
Природа	68.27	26.10	1.13	3.59	0.91

Видно, что помимо вольфрама и рения, появление которых можно объяснить миграцией из спирали нагревателя, в керамической трубке сильно возросло содержание бора, в также нуклидов с атомными массами 43-53, 64-83, 107-130, 198-208.

В **таблице 10** показаны результаты анализа соотношения изотопов никеля в топливе, а также в окружающей топливо керамике и в веществе, накопившемся между внутренней и наружной трубками, до и после работы реактора. При анализе изотопного состава, во избежание ошибок, связанных с регистрацией <sup>64</sup>Zn, для доли <sup>64</sup>Ni было принято значение из справочника [30].

Видно, что изотопный состав никеля в топливе до и после работы в реакторе практически не изменился. Некоторые отличия заметны в результатах, полученных для керамической трубки и вещества между трубками. Но эти результаты нельзя считать точными, так как концентрация никеля в исследованных образцах недостаточно высокая для уверенного анализа.

Помимо ГЕОХИ РАН, анализ топлива до и после работы в реакторе, а также вещества из пространства между внутренней и внешней трубками сделан в исследовательской компании Coolestence LLC, Boulder, Colorado, USA. Были сделаны EDS анализы с использованием



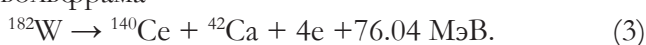
**Рис. 14.** Реактор КВЗ, вскрытый после окончания работы.



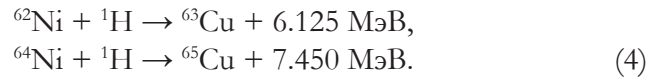
электронного сканирующего микроскопа, а также анализы с использованием методики ICP-MS. Эти исследования подтвердили незначительность изменения изотопного состава топлива, появление в топливе порядка 1% меди и наличие множества нуклидов в веществе из пространства между трубками.

## 10. ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, значительное изменение нуклидного состава в результате работы исследованных никель-водородных реакторов происходит не только в топливе, но и в керамике, окружающей активную зону реактора. Кроме того, в полости между внутренней и наружными трубками накапливается вещество, содержащее натрий, калий, кремний, железо, бор, кальций, цинк и множество других элементов. Особенно много появляется вольфрама. Разумно предположить, что источником вольфрама является раскаленная до высокой температуры спираль нагревателя. Наиболее понятным механизмом миграции вещества является испарение в местах с высокой температурой и конденсация в менее нагретых местах. Как показывают измерения, температура провода нагревателя достигает 1700°C. Но даже при такой температуре плотность паров вольфрама ( $<10^{-10}$  Па) слишком низкая для того, чтобы этот механизм мог работать с заметной интенсивностью. Очевидно, происходят более сложные физико-химические процессы при участии водорода и иных реагентов, которые могут находиться в реакторе. Возможно, что и ряд других элементов появляется в результате миграции из конструкционных материалов, так как натрий, калий, кремний, кальций, железо и ряд других элементов содержатся в заметных количествах в проводе нагревателя, термopарах и в керамике. Но некоторых элементов (кобальт, церий, галлий, германий, мышьяк, селен, кадмий, теллур), появившихся в значительных количествах, в исходном топливе и конструктивных материалах практически нет. Это указывает на возможность их появления в результате ядерных трансмутаций. Например, церий может быть продуктом деления ядер вольфрама



Обращает на себя внимание появление значительного количества меди в топливе реактора КВЗ (0.84%  $^{63}\text{Cu}$  и 0.42%  $^{65}\text{Cu}$ ) общей массой около 20 мг. Можно предположить, что это связано с протеканием ядерных реакций



При образовании 20 мг меди в результате протекания реакций (4) выделяется около 200 МДж. Такое энерговыделение не противоречит общему избыточному тепловыделению на реакторе КВЗ (около 400 МДж). Помимо выделения тепла, появление такого количества меди должно вызвать снижение относительного содержания  $^{62}\text{Ni}$  на 0.8% и  $^{64}\text{Ni}$  на 0.4%. Данные, представленные в **таблице 10**, не показывают таких изменений. Следует заметить, что прогнозируемые изменения лежат в пределах возможной ошибки измерений, а содержание  $^{64}\text{Ni}$  вообще трудно надежно измерить из-за неконтролируемых добавок  $^{64}\text{Zn}$ .

## 11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные эксперименты, проведенные в разных лабораториях, подтверждают выделение в никель-водородных системах тепловой энергии, многократно превышающей тепловыделение, возможное в химических процессах. Уровень накопленных эмпирических знаний в этой области позволяет уже размышлять о переходе от экспериментальных макетов к разнообразным практическим применениям, к необычайно эффективным и экологически чистым технологиям.

В ходе процессов, происходящих в никель-водородных системах, обнаружены изменения элементного и изотопного состава вещества. Это указывает на то, что аномально высокое тепловыделение в этих системах, возможно, связано с превращениями на ядерном уровне. То, что такие превращения происходят при очень низких по ядерным меркам температурах, а также отсутствие жестких ядерных излучений и радиоактивности, указывает на необходимость искать необычные подходы для объяснения обнаруженных эффектов. Проблема в том, что объяснение не сводится к поиску возможностей преодоления кулоновского барьера, препятствующего тесному сближению

и слиянию ядер [13]. Наиболее загадочным является отсутствие (или очень малая интенсивность) ядерных излучений в процессе холодных трансмутаций и образование только изотопов, не обладающих радиоактивностью.

1. Проведен анализ изотопного и элементного состава вещества в четырех никель-водородных реакторах различной конструкции с наработкой избыточной энергии от 100 до 790 МДж. Исследованы не только изменения в топливе, но и в материалах, прилегающих к активной зоне. Кроме того, исследован состав вещества, накапливающегося в полости реактора вблизи активной зоны.

2. Достоверных изменений изотопного состава никеля и лития, за исключением анализа топлива реактора АП2 в университете Uppsala (Швеция), не обнаружено.

3. Значительное возрастание концентрации примесей целого ряда нуклидов обнаружено не только в топливе, но и в конструкционных элементах, примыкающих к активным зонам реакторов. Помимо вольфрама и рения, появление которых можно объяснить миграцией из спирали нагревателя, в них сильно возрастает содержание бора, в также нуклидов с атомными массами 43-53, 64-83, 107-130, 198-208.

4. В веществе, накопившемся в полости реактора вблизи активной зоны, помимо вольфрама, присутствует много железа, натрия, калия, никеля, кремния, кальция, скандия и других элементов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Fleishmann M, Pons S, Hawkins M. Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium. *J. Electroanal. Chem.*, 1989, 261:301-308.
2. Филимоненко ИС. Демонстрационная термоэмиссионная установка для ядерного синтеза. *Материалы 3 научн. симп. "Перестройка естествознания"-92*, Волгодонск, Россия, 17-19 апр. 1992.
3. Великодный ВЮ, Еремеев АВ, Казеннов АЮ и др. Эксперименты по регистрации аномально высокого относительного выхода тепла при высоковольтном электролизе тяжелой воды. *Материалы 12 рос. конф. по*

*холодной трансмутации ядер химических элементов*, Сочи, 19-26 сентября 2004, с. 98-109.

4. Паньков ВА, Кузьмин БП. Демонстрационная методика синтеза элементов из воды в плазме электрического разряда. *Актуальные проблемы современной науки*, 2008, 5(44):112-116.
5. *Взаимопревращения химических элементов*. Под ред. В.Ф. Балакирева. Екатеринбург, УРО РАН, 2003, 64 с.
6. *Controlled Nucleosynthesis. Breakthroughs in Experiment and Theory*. Series: Fundamental Theories of Physics. Vol. 156. Eds. Adamenko S, Selleri F, Merwe A, 780 p., Springer, 2007.
7. Urutskoev LI, Liksonov VI. Observation of transformation of chemical elements during electric discharge. – <http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0101/0101089.pdf>
8. Bazhutov YuN, Velikodny VYu, Grishin VG et al. Neutrons, Gamma-Rays & Tritium Diagnostic at Electrolysis in Water Solutions. *Proc. 13 Intern. Conf. on Condensed Matter Nuclear Science (ICCF-13)*. Sochi, June 25-July 1, 2007, p. 156-169.
9. Пархомов АГ. Холодная трансмутация ядер: странные результаты и попытки их объяснений. *Журнал формирующихся направлений науки (ЖФНН)*, 2013, 1(1):71-76. - <http://www.unconv-science.org/pdf/1/parkhomov-ru.pdf>.
10. Kervran C. *Transmutations Biologique et Physique Moderne*. Paris, Librairie Maloine S.A., 1982.
11. Высоккий ВИ, Корнилова АА. *Ядерный синтез и трансмутация изотопов в биологических системах*. М., Мир, 2003, 161 с.
12. Focardi S, Habel R, Piantelli F. Anomalous Heat Production in Ni-H Systems. *Nuovo Cimento*, 1994, 107A(1):163-167.
13. Focardi S, Gabbani V, Piantelli F et al. Large excess heat production in Ni-H systems. *Nuovo Cimento*, 1998, 111A(11):1233-1242.
14. Battaglia A, Daddi L, Focardi S et al. Neutron emission in Ni-H systems. *Nuovo Cimento*, 1999, 112A(9):921-931.
15. Focardi S, Gabbani V, Piantelli F et al. Evidence of electromagnetic radiation from Ni-H Systems. *Proc. 11 Intern. Conf. on Condensed Matter Nuclear Science (ICCF-11)*, 2004, Marseille, France. <http://www.nichenergy.com>.
16. <http://www.nichenergy.com>.
17. Бажутов ЮН, Корецкий ВП, Пархомов АГ и др. Исследование радиационных эффектов

- при насыщении  $\text{LaNi}_5$ , никеля и бериллия водородом. *Материалы 19 Росс. конф. по холодной трансмутации ядер и шаровой молнии*. Криница, Краснодарский край, 3-10 сентября 2012, с. 129-142.
18. Celani F, Marano EF, Spallone A. Cu-Ni-Mn alloy wires, with improved sub-micrometric surfaces, used as LENR device by new transparent, dissipation-type, calorimeter. *J. Condens. Matter Nucl. Sci.*, 2014, 13:56-67.
19. Takahashi A, Kitamura A, Taniike A et al. Anomalous exothermic and endothermic data observed by nano-Ni-composite samples. – <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/handle/10355/36494>.
20. Бажутов ЮН. Теплогенератор России и Фокарди. *Изобретательство*, 2012, 12(1):49-59.
21. Патент Италии № 0001387256, международная заявка WO/2009/125444. Date: Aug.04, 2008.
22. Levi G, Foschi E, Höistad B. et al. Indication of anomalous heat energy production in a reactor device. – *arXiv:1305.3913v3* [physics.gen-ph].
23. Levi G, Foschi E, Höistad B. Observation of abundant heat production from a reactor device and of isotopic changes in the fuel. – <http://www.sifferkoll.se/sifferkoll/wp-content/uploads/2014/10/LuganoReportSubmit.pdf>.
24. Пархомов АГ. Отчет международной комиссии об испытании высокотемпературного теплогенератора России. *ЖФНН*, 2014, 2(6):57-61. – <http://www.unconv-science.org/pdf/6/parkhomov2-ru.pdf>.
25. Пархомов АГ. Исследование аналога высокотемпературного теплогенератора России. *ЖФНН*, 2015, 3(7):68-72 – <http://www.unconv-science.org/pdf/7/parkhomov-ru.pdf>.
26. Пархомов АГ. Никель-водородные реакторы, созданные после публикации отчета об эксперименте в Лугано. *ЖФНН*, 2016, 11(11):58-62 – <http://www.unconv-science.org/n11/parkhomov>.
27. Алабин КА, Андреев СН, Пархомов АГ. Результаты анализа изотопного и элементного состава топлива никель-водородных реакторов. *ЖФНН*, 2015, 3(10):49-53 – <http://www.unconv-science.org/pdf/10/alabin-ru.pdf>.
28. Пархомов АГ. Результаты испытаний нового варианта аналога высокотемпературного теплогенератора России. *ЖФНН*, 2015, 3(8):34-38 – <http://www.unconv-science.org/pdf/8/parkhomov-ru.pdf>.
29. Пархомов АГ. Длительные испытания никель-водородных теплогенераторов в проточном калориметре. *ЖФНН*, 2016, 4(12-13):74-79 – <http://www.unconv-science.org/pdf/12/parkhomov-ru.pdf>.
30. *Физические величины. Справочник*. Под редакцией Григорьева И.С. и Мейлихова Е.З. М., Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.

**Пархомов Александр Георгиевич**

*к.ф.-м.н.*

Опытно-конструкторская лаборатория "К.И.Т."  
10/2, ул. Герасима Курина, Москва 121108, Россия  
[alexparh@mail.ru](mailto:alexparh@mail.ru)

**Алабин Кирилл Алексеевич**

*к.т.н.*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
38, ул. Вавилова, Москва 119991, Россия  
[alabin.kirill@gmail.com](mailto:alabin.kirill@gmail.com)

**Андреев Степан Николаевич**

*д.ф.-м.н., проф.*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
38, ул. Вавилова, Москва 119991, Россия  
[naukagri@yandex.ru](mailto:naukagri@yandex.ru)

**Забавин Сергей Николаевич**

*к.т.н.*

Опытно-конструкторская лаборатория "К.И.Т."  
10/2, ул. Герасима Курина, Москва 121108, Россия  
[sergeyzabavin@gmail.com](mailto:sergeyzabavin@gmail.com)

**Соболев Александр Георгиевич**

*д.ф.-м.н.*

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН  
53, Ленинский просп., Москва 119991, Россия  
[asob09@gmail.com](mailto:asob09@gmail.com)

**Тимербулатов Тимур Рафкатович**

*д.э.н.*

Опытно-конструкторская лаборатория "К.И.Т."  
10/2, ул. Герасима Курина, Москва 121108, Россия  
[kohf1@konfi.ru](mailto:kohf1@konfi.ru)

## NICKEL-HYDROGEN REACTORS: HEAT GENERATION, ISOTOPIC AND ELEMENTAL COMPOSITION OF FUEL

**Alexander G. Parkhomov, Sergey N. Zabavin, Timur R. Timerbulatov**

Experimental-design laboratory "K.I.T."

Moscow 121108, Russian Federation

alexparh@mail.ru, sergeyzabavin@gmail.com, konfi1@konfi.ru

**Kirill A. Alabin, Stepan N. Andreev**

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, <http://www.gpi.ru>

Moscow 119991, Russian Federation

alabin.kirill@gmail.com, naukagpi@yandex.ru,

**Alexander G. Sobolev**

Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, <http://www.lebedev.ru>

Moscow 119991, Russian Federation

asob09@gmail.com

---

*Abstract.* At the interaction of hydrogen with a number of metals, including Nickel, are observed not only mechanical and chemical changes, but also such extraordinary phenomena as the anomalously large heat generation and the change in isotopic and elemental composition. An overview of experiments that explore these phenomena is presented. Also the results of analysis of the isotopic and elemental composition of the fuel and substances near the active zone of nickel-hydrogen reactors before and after work with the production of excess energy to 790 MJ are presented. Reliable changes in the isotopic composition of nickel and lithium are not detected. A significant increase in the concentration of impurities of a number of nuclides discovered, not only in fuel but also in structural elements adjacent to the active zones of reactors.

*Keywords:* hydrogen, nickel, heat generation, isotopic composition, radiation

**UDC 53.043**

*Bibliography* – 30 references

*Received* 19.06.2017

*RENSIT*, 2017, 9(1):74-93

**DOI:** 10.17725/rensit.2017.09.074

---