

# Результаты анализа изотопного и элементного состава топлива никель-водородных реакторов

К.А. Алабин<sup>1</sup>, С.Н. Андреев<sup>1</sup>, А.Г. Пархомов<sup>2</sup>

**Аннотация**—Представлены результаты анализа изотопного и элементного состава топлива до и после работы в теплогенераторе Росси, а также в аналогичных реакторах. В результате работы реактора Росси (наработка 5800 МДж избыточного тепла) произошли сильные изменения как элементного, так и изотопного состава топлива. В топливе реактора АП2 (150 МДж избыточного тепла) произошло значительное возрастание содержания  $\text{Cr}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{V}$ , снизилось содержание  $\text{Ni}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Al}$ ; обнаружено небольшое возрастание соотношения  ${}^6\text{Li} / {}^7\text{Li}$ . На китайском реакторе (>13 МДж избыточного тепла) при исследовании топлива обнаружено небольшое снижение содержания  ${}^6\text{Li}$ . На реакторе GS3 (17 МДж избыточного тепла) изотопных изменений в литии и никеле не обнаружено.

После публикации отчета об испытании в Лугано высокотемпературного теплогенератора Андреа Росси [1], [2] появилась возможность изготовления аналогичных устройств. Предпринято более десятка попыток их создания [3]. В некоторых из них продемонстрировано выделение тепла, значительно превышающее затраченную электроэнергию. Но остается неясной природа этого удивительного эффекта. Зарегистрированное избыточное тепловыделение многократно превосходит возможности химических реакций и сопоставимо с энергоснабжением при ядерных реакциях, хотя и не сопровождается губительной радиацией и радиоактивностью. Важнейшее значение для прояснения природы этого эффекта имеет исследование изменений атомного и изотопного состава топлива в процессе работы реакторов. Проведение таких анализов является довольно сложным и дорогостоящим делом, поэтому они были сделаны лишь для нескольких реакторов.

## I. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТНОГО И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА

Во всех реакторах, о которых идет речь в этой статье, в качестве топлива использована смесь  $\text{Ni} + \text{LiAlH}_4$ . Используются следующие методы анализа:

1. Метод SEM-EDS. Сканирующий электронный микроскоп в сочетании с рентгеновским энергодисперсионным анализатором элементного состава в заданных точках поверхности.

2. Метод LIBS. Лазерный атомно-эмиссионный. Лазерное испарение с анализом оптического спектра.

3. ToF-SIMS. Времяпролетная масс-спектрометрия вторичных ионов. Позволяет определять изотопный состав.

4. Метод ICP-MS. Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой. Позволяет определять изотопный состав.

5. Метод ICP-AES атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой. Позволяет определять элементный состав.

Первые три метода дают информацию об элементах, присутствующих в поверхностном слое до глубины несколько нанометров. ICP-MS, ICP-AES являются методами, дающими средний изотопный состав исследуемого образца.

## II. АНАЛИЗ ТОПЛИВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РЕАКТОРА А.РОССИ

Испытанный в Лугано реактор работал с 24 февраля до 29 марта 2014 г. при температуре 1280 – 1400 °С с избыточной мощностью до 2,3 кВт. Всего выработано 5800 МДж (1600 кВт·час) избыточного тепла [1], [2].

Анализ топлива методом SEM-EDS сделан в университете Högskolan Dalarna, Швеция. Исследование топлива до загрузки в реактор обнаружило гранулы трех сортов: с высоким содержанием  $\text{Al}$  (вероятно, кристаллы алюмогидрида лития  $\text{LiAlH}_4$ ), с высоким содержанием никеля (порошок никеля) и с высоким содержанием железа.

Исследование этим методом топлива после работы в реакторе обнаружило гранулы двух сортов: с высоким содержанием никеля и с высоким содержанием кислорода.

Таблица I  
 МАССОВАЯ ДОЛЯ  $\text{Ni}$ ,  $\text{Li}$ , И  $\text{Al}$  В ИСХОДОМ И  
 ОТРАБОТАВШЕМ ТОПЛИВЕ (%).

Элементы	Ni	Ni	Li	Al	Al
До загрузки	55.4	55.0	1.17	4.36	4.39
После работы	95.9	95.6	0.03	0.00	0.05

Анализ элементного состава топлива до и после работы в реакторе Росси методом ICP-AES сделан в университете Uppsala, Швеция (Таблица I).

<sup>1</sup> ИОФ РАН, Москва.

<sup>2</sup> alexparh@mail.ru.

Основными анализируемыми элементами были Ni, Li и Al. Содержание Li и Al определялось по двум независимым эмиссионным линиям для предотвращения возможной систематической ошибки. Количественное измерение содержания C, H, O, N, He, Ar и F не может быть сделано использованным методом.

Кроме Ni, Li и Al, в *исходном топливе* обнаружена довольно высокая концентрация C, Ca, Cl, Fe, Mg, Mn. Заметное количество этих элементов в отработавшем топливе не обнаружено.

Исследование изотопного состава топлива сделано двумя методами. Анализ методом TOF-SIMS сделан в университете Högskolan Dalarna (Швеция). Анализ методом ICP-MS сделан в университете Uppsala (Швеция) - Таблица II.

Таблица II  
Изотопный состав исходного и отработавшего топлива реактора Росси (%), а также природное соотношение изотопов в этих элементах.

	Исходное топливо		Отраб. 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	99,3	3,6
<sup>64</sup> Ni	1		0		0,9

Результаты анализа изотопного состава позволяют сделать следующие выводы.

1. Соотношение изотопов лития и никеля в исходном топливе практически не отличается от природного.
2. В отработавшем топливе существенно возросло относительное содержание <sup>6</sup>Li и снизилось содержание <sup>7</sup>Li.
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%.
4. Анализ ToF-SIMS показал наличие протия, но не заметил присутствие дейтерия.

### III. РЕАКТОРЫ АП

Реактор АП1, аналогичный теплогенератору Росси, проработал 20 декабря 2014 г. 90 минут с избыточной мощностью до 860 Вт [4]. Выработано около 3,2 МДж (0,9 кВт-час) избыточного тепла. Это в 500 раз меньше наработки реактора в Лугано, поэтому сильных изменений на ядерном уровне произойти не могло. Тем не менее, анализ методом LIBS обнаружил достоверное увеличение в топливе после работы в реакторе содержания Na, Si, K, Sr. Снизилось содержание Li и Al.

Намного продолжительнее (более четырех суток) проработал реактор АП2 [5]. При температуре 1200 °C избыточная мощность достигала 800 Вт. Выработано 150

МДж (40 кВт-час) 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).

На рис. 1 показан вид топлива в сканирующем электронном микроскопе. Исследования показали сильное различие результатов для разных мест отбора пробы. Тем не менее, в топливной смеси до загрузки в реактор уверенно различаются две фракции: серые кристаллы и белые гранулы. В серых кристаллах обнаружены в основном Al, O и Cl. Так как метод SEM-EDS не способен определять литий, очевидно, что серые кристаллы – это не вполне чистый алюмогидрид лития. Белые гранулы состоят из никеля с небольшой примесью железа, алюминия и кислорода.

В топливе после работы в реакторе видны белые оплавленные и серые шлаковидные структуры. Белые структуры содержат в основном никель с примесью Fe, Al, Cr, Mn, Si, O. Шлаковидные структуры состоят в основном из Al и O. Вероятно, это продукты разложения алюмогидрида лития.

Анализ элементного состава топлива до и после работы в реакторе АП2 с использованием лазерного атомно-эмиссионного спектрометра сделан в ИОНХ РАН (Таблица III).

Видно, что содержание K и Sr выросло в десятки раз. Многократно увеличилось содержание Si, Na, Mg, Ca, Ti, V. Снизилось содержание Al, Ni, Cl, Mn, Cu, Zn. Следует отметить, что этот метод анализа, как и анализ с применением сканирующего электронного микроскопа, дает информацию об атомном составе лишь на поверхности исследуемого вещества. Эти результаты вполне соответствуют данным, полученным при анализе топлива реактора АП1.

Анализ изотопного состава топлива до и после работы в реакторе АП2 методом ICP-MS сделан в ГеоХи РАН. Результаты этого анализа показаны на рис. 2 и в Таблице IV.

Видно, что после работы в реакторе снизилось общее содержание алюминия и лития, причем немного возросло соотношение <sup>6</sup>Li / <sup>7</sup>Li. Достоверных изменений изотопного состава Ni не обнаружено.

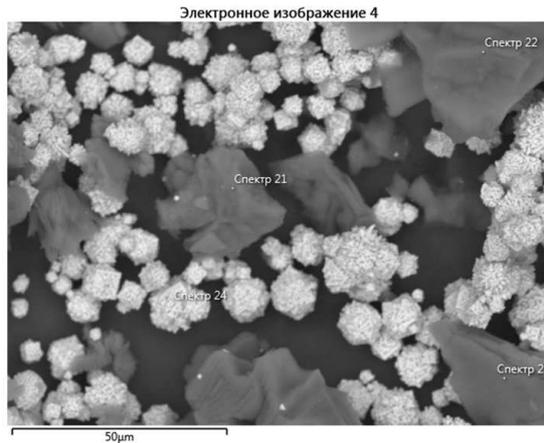
### IV. РЕАКТОРЫ GLOWSTICK

Реакторы GlowStick созданы Аланом Голдуотером. в рамках проекта MFMP [3], [6].

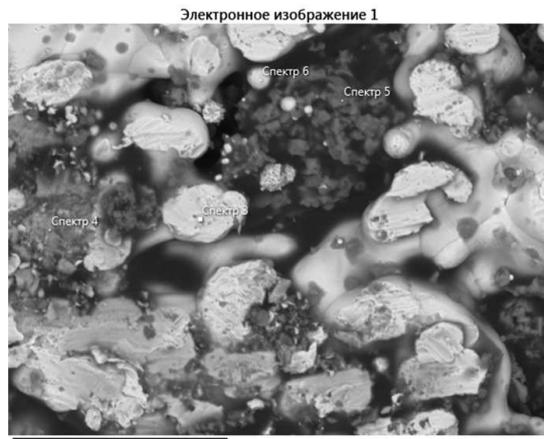
Реактор GS2 проработал 2-3 апреля 2015 при температуре около 1000°C. 5-6 мая была попытка повторного запуска. Признаков избыточного тепловыделения не обнаружено.

Реактор GS3 проработал 28-30 мая 2015. Реактор проработал около 30 часов при средней избыточной мощности 160 Вт, выработав 4,8 кВт-час (17 МДж) избыточной энергии.

Анализы топлива до и после этих запусков сделаны в университете Миссури (США). Анализировалось



(a)



(b)

Рис. 1. Топливо в сканирующем электронном микроскопе (реактор АП2) до заправки в реактор (а) и после извлечения из реактора (b).

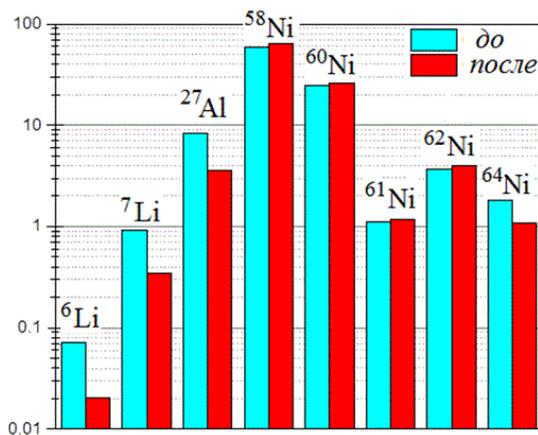


Рис. 2. Содержание изотопов лития, алюминия и никеля в топливе до и после работы в реакторе АП2.

Таблица III

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА ДО И ПОСЛЕ РАБОТЫ В РЕАКТОРЕ АП2, СДЕЛАННОГО НА ЛАЗЕРНОМ СПЕКТРОМЕТРЕ. ПРИВЕДЕНЫ ОТНОШЕНИЯ И РАЗНОСТИ СОДЕРЖАНИЯ КАЖДОГО ЭЛЕМЕНТА ДО И ПОСЛЕ РАБОТЫ РЕАКТОРА.

Элемент	% атомные			
	До	После	После/до	После-до
Li		9,5861		
B	0,0343	0,0327	0,953	-0,002
C	3,8231	7,4318	1,944	3,609
O	35,0812	42,3785	1,208	7,297
F	0,005	0,01	2,000	0,005
Na	0,031	0,1476	4,761	0,117
Mg	0,0034	0,0192	5,647	0,016
Al	20,2859	17,0474	0,840	-3,239
Si	0,2505	2,1615	8,629	1,911
P	0,0026	0,0037	1,423	0,001
S	0,0056	0,0076	1,357	0,002
Cl	0,1752	0,047	0,268	-0,128
K	0,0113	0,3572	31,611	0,346
Ca	0,01	0,0328	3,280	0,023
Ti	0,0009	0,0087	9,667	0,008
V	0,0009	0,0084	9,333	0,008
Cr	0,0358	1,4396	40,212	1,404
Mn	3,6826	0,2936	0,080	-3,389
Fe	0,1375	0,1846	1,343	0,047
Co	0,0014	0,0011	0,786	0,000
Ni	36,4072	18,795	0,516	-17,612
Cu	0,0074	0,0043	0,581	-0,003
Zn	0,0073	0,0016	0,219	-0,006
Сумма	100,0	100,0		

Элемент	% массовые			
	До	После	После/до	После-до
Li		2,5769		
B	0,0105	0,0137	1,305	0,003
C	1,3046	3,4573	2,650	2,153
O	15,9477	26,2644	1,647	10,317
F	0,0027	0,0074	2,741	0,005
Na	0,0202	0,1315	6,510	0,111
Mg	0,0023	0,0181	7,870	0,016
Al	15,5446	17,8091	1,146	2,265
Si	0,1997	2,3494	11,765	2,150
P	0,0023	0,0045	1,957	0,002
S	0,0051	0,0094	1,843	0,004
Cl	0,1765	0,0646	0,366	-0,112
K	0,0125	0,5411	43,288	0,529
Ca	0,0114	0,0509	4,465	0,040
Ti	0,0012	0,0162	13,500	0,015
V	0,0013	0,0166	12,769	0,015
Cr	0,0528	2,9002	54,928	2,847
Mn	5,7473	0,6248	0,109	-5,123
Fe	0,2183	0,3994	1,830	0,181
Co	0,0023	0,0026	1,130	0,000
Ni	60,7095	42,7277	0,704	-17,982
Cu	0,0134	0,0105	0,784	-0,003
Zn	0,0135	0,004	0,296	-0,010
Сумма	100,0	100,0		

Таблица IV

ТАБЛИЦА 4. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ИЗОТОПОВ ЛИТИЯ И НИКЕЛЯ ДО И ПОСЛЕ РАБОТЫ В РЕАКТОРЕ АП2.

	До	После	Природа
<sup>6</sup> Li	7.4	7.9	7.5
<sup>7</sup> Li	92.6	92.1	92.5
<sup>58</sup> Ni	64.0	65.0	68.3
<sup>60</sup> Ni	26.4	27.1	26.1
<sup>61</sup> Ni	1.2	1,2	1.13
<sup>62</sup> Ni	4.0	4,1	3.59
<sup>64</sup> Ni	4.4	2.6	0.91

Lithium isotope ratios		Nickel isotope ratios			
	$^7\text{Li}/^6\text{Li}$	$^{60}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$	$^{61}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$	$^{62}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$	$^{64}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$
LiAlH <sub>4</sub>	12,52				
LiAlH <sub>4</sub>	12,49				
LiAlH <sub>4</sub>	12,45				
LiAlH <sub>4</sub>	12,48				
LiAlH <sub>4</sub>	12,46				
sample 1	12,47	0,3841	0,01671	0,05327	0,01362
sample 1	12,45	0,3883	0,01675	0,05371	0,01357
sample 2	12,45	0,3864	0,01673	0,05346	0,01349
sample 2	12,47	0,3873	0,01680	0,05373	0,01354
sample 3	12,43	0,3845	0,01658	0,05321	0,01356
sample 3	12,48	0,3878	0,01702	0,05376	0,01352
sample 2	12,45				
sample 2	12,47				
sample 3	12,43				
sample 3	12,48				
Natural ratio	12,18	0,3852	0,01674	0,05339	0,01360

Most results are within 1 standard deviation of natural ratios.  
All results are within 2 standard deviations of natural ratios.

Рис. 3. Результаты анализа топлива методом ICP-MS до и после работы в реакторах GS2 и GS3.

Таблица V  
Соотношение изотопов Ni и Li, определенное методом ICP-MS, для реактора SONGSHENG JIANG.

Isotope ratio	Before experiment	After experiment		
		1	2	3
$^{60}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$	$0.3852 \pm 0.0005$	$0.3854 \pm 0.0005$	$0.3854 \pm 0.0005$	$0.3854 \pm 0.0005$
$^{61}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$	$0.1673 \pm 0.00004$	$0.01671 \pm 0.00004$	$0.01671 \pm 0.00004$	$0.01670 \pm 0.00004$
$^{62}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$	$0.05340 \pm 0.00012$	$0.05342 \pm 0.00012$	$0.05343 \pm 0.00012$	$0.05342 \pm 0.00012$
$^{64}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$	$0.01356 \pm 0.000006$	$0.01357 \pm 0.00006$	$0.01367 \pm 0.00006$	$0.01357 \pm 0.00006$
$^6\text{Li}/^7\text{Li}$	$0.0812 \pm 0.0009$	$0.0779 \pm 0.0008$	$0.0782 \pm 0.0008$	$0.0792 \pm 0.0009$

соотношение изотопов лития и никеля методом ICP-MS. Исследованы образцы Ni и LiAlH<sub>4</sub>, из которых составлялись топливные смеси, а также 1) Топливная смесь до заправки в реактор; 2) Топливо, отработавшее в реакторе GS2 (без наработки избыточной энергии); 3) Топливо, отработавшее в реакторе GS3 (наработка избыточной энергии 17 МДж). Результаты исследований показаны на рис. 3.

Достоверных отличий от природного изотопного состава в литии и никеле не обнаружено ни в одном из проанализированных образцов.

#### V. АНАЛИЗ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА В КИТАЙСКОМ РЕАКТОРЕ (SONGSHENG JIANG, NI-H RESEARCH GROUP, CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY, BEIJING, CHINA)

Эксперимент проходил 4-8 мая 2015 [3], [7]. Избыточная мощность более 600 Вт удерживалась на протяжении 6 часов. Точное определение величины избыточной мощности невозможно, так как температура в реакторе превысила предел измерений (1370 °C). Наблюдался участок самоподдерживающегося режима продолжительностью около 10 минут.

Изменение соотношения изотопов никеля не обнаружено. Содержание <sup>6</sup>Li снизилось с 7,5% до 7,2% (см. Таблицу V).

#### VI. ВЫВОДЫ

В результате 32-суточной работы реактора Росси произошли сильные изменения изотопного состава лития и никеля. Кроме Ni, Li и Al, в исходном топливе обнаружены C, Ca, Cl, Fe, Mg, Mn, причем, заметное количество этих элементов в отработавшем топливе не обнаружено.

Наработка избыточной энергии в реакторе АП2 в 40 раз меньше, чем в реакторе Росси. Вероятно, с этим связана малозаметность изменений изотопного состава. Заметно лишь небольшое возрастание соотношения <sup>6</sup>Li / <sup>7</sup>Li. Произошло значительное возрастание содержания Cr, K, Si, Na, Mg, Ca, Ti, V. Снизилось содержание Ni, Mn, Cl, Zn, Cu, Al.

На китайском реакторе обнаружено небольшое *снижение* содержания <sup>6</sup>Li в отличие от возрастания, обнаруженного на реакторах Росси и АП2.

Наработка избыточной энергии на реакторе GS3 в сотни раз меньше, чем на реакторе Росси. Закономерно, что тщательный анализ изотопных изменений в литии и никеле не обнаружил.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] G. Levi, E. Foschi, B. Höistad, R. Pettersson, L. Tegnér, H. Essén. 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>.
- [2] А.Г. Пархомов. Отчет международной комиссии об испытании высокотемпературного теплогенератора Росси. *ЖФНН*, 2(6):57–61, 2014.
- [3] Пархомов А.Г. Никель-водородные реакторы, созданные после публикации отчета об эксперименте в Лугано. Презентация доклада на 22 Российской конференции по холодной трансмутации ядер и шаровой молнии. Дагомыс, Сочи, 27.9-4.10 2015 г. <https://yadi.sk/i/JM5BH21QjijAB>.
- [4] А.Г. Пархомов. Исследование аналога высокотемпературного теплогенератора Росси. *ЖФНН*, 3(7):68–72, 2015.
- [5] А.Г. Пархомов. Результаты испытаний нового варианта аналога высокотемпературного теплогенератора Росси. *ЖФНН*, 3(8):34–38, 2015.
- [6] <http://www.quantumheat.org>.
- [7] <http://www.e-catworld.com/2015/09/10/isotopic-analysis-of-fuel-and-ash-after-72-hour-experiment-songsheng-jiang>.