Анализ изменений изотопного и элементного состава в никельводородных реакторах

А.Г. Пархомов¹, К.А. Алабин², С.Н. Андреев²,

С.Н. Забавин¹, А.Г.Соболев³, Т.Р.Тимербулатов¹

¹ОКЛ КИТ, Москва ²ИОФ РАН, Москва ³ФИАН РАН, Москва В настоящее время созданы устройства, выделяющие энергию, сопоставимую с энерговыделением при ядерных реакциях, но не сопровождающуюся губительной радиацией и радиоактивностью.

Природа этого удивительного эффекта остается неясной. Важнейшее значение для решения этой проблемы имеет исследование элементных и изотопных изменений в процессе работы реакторов.

В этом докладе представлена информация о результатах анализа изменений в топливе и в конструкционных материалах, происшедших в нескольких никель-водородных реакторах, созданных нашим коллективом.

Оценка величины эффекта

 $^{62}\text{Ni} + ^{1}\text{H} \rightarrow ^{63}\text{Cu} + 6,125 \text{ M} \Rightarrow \text{B}$

1 МДж = $6.25 \cdot 10^{18}$ МэВ $\rightarrow 1.02 \cdot 10^{18}$ ядер 63 Cu \rightarrow **0.00011 г ^{63}Cu**

В 1 г никеля при выделении энергии 1 МДж образуется 0,01% меди Можно заметить.

Смесь изотопов никеля содержит 3,6% ⁶²Ni. При выделении энергии 1 МДж содержание ⁶²Ni меняется на 1/360. Заметить практически невозможно.

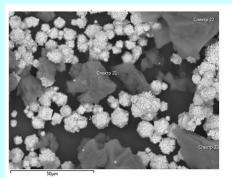
Итак, если аномальное тепловыделение действительно связано изменениями на ядерном уровне, появление нуклидов, *изначально отсутствующих* в исходном топливе, может быть обнаружено при наработках избыточной энергии порядка 1 МДж на грамм топлива.

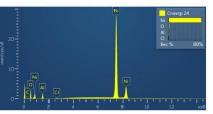
Для надежного выявления изменений соотношений изотопов требуются наработки избыточной энергии больше 100 МДж/г.

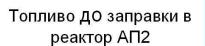


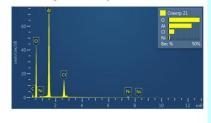
Реактор АП2

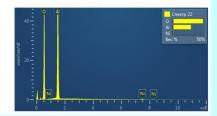
Реактор был загружен топливной смесью 640 мг Ni + 60 мг LiAlH $_4$. Он работал 16-22 марта 2015, произведя около 150 МДж избыточного тепла.

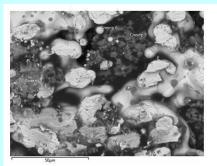


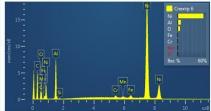




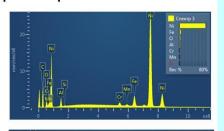


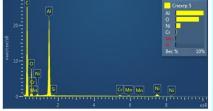






топливо ПОСЛЕ извлечения из реактора АП2

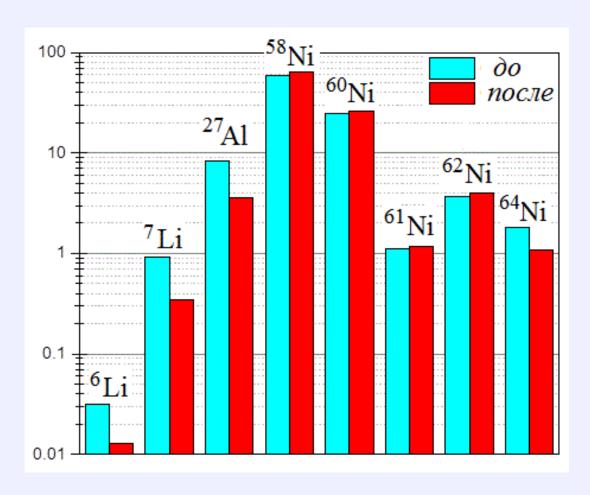




Анализ элементного состава с использованием электронного сканирующего микроскопа (ИОФ РАН)

Элементный состав топлива до и после работы в реакторе АП2, определенный лазерным атомно-эмиссионным спектрометром (ИОНХ РАН)

% атомные										
Элемент	До	После	После/до							
В	0,034	0,036	1,05							
С	3,82	8,22	2,15							
0	35,08 46,87		1,34							
F	0,005	0,011	2,21							
Na	0,031	0,163	5,26							
Mg	0,003	0,021	6,25							
Al	20,28	18,85	0,92							
Si	0,25	2,39	9,54							
Р	0,0026	0,0041	1,57							
S	0,0056	0,0084	1,50							
CI	0,175	0,052	0,29							
K	0,011	0,395	34,9							
Ca	0,01	0,036	3,63							
Ti	0,0009	0,0096	10,6							
٧	0,0009	0,0093	10,3							
Cr	0,035	1,59	44,4							
Mn	3,68	0,32	0,08							
Fe	0,13	0,20	1,48							
Co	0,0014	0,0012	0,86							
Ni	36,40.	20,78	0,57							
Cu	0,0074	0,0048	0,64							
Zn	0,0073	0,0018	0,24							
Сумма	100,0	100,0								



Изотопный состав топлива до и после работы в реакторе АП2. Анализ сделан методом ICP-MS в ГеоХи РАН

Изотопный анализ топлива на реакторе АП2 методом ICP-MS

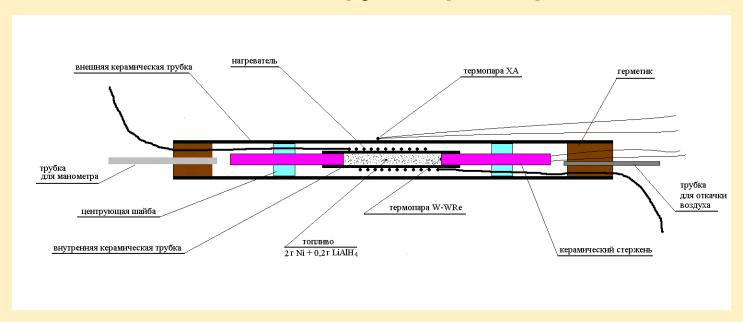
в ГеоХи РАН

%	⁶ Li	⁷ Li	⁵⁸ Ni	⁶⁰ Nī	⁶¹ Ni	⁶² Ni	⁶⁴ Ni
До	7,4	92,6	64,0	26,4	1,2	4,0	4,4
После	7,9	92,1	65,0	27,1	1,2	4,1	2,6
Природа	7,5	92,5	68,3	26,1	1,13	3,59	0,91

в университете Uppsala (Швеция)

%	⁶ Li	⁷ Li	⁵⁸ Ni	⁶⁰ Nī	⁶¹ Ni	⁶² Ni	⁶⁴ 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

Типичная конструкция реакторов



Один из испытанных в комплексе с проточным калориметром реакторов «Проток-6» непрерывно проработал с 11 апреля до 29 мая 2016г с выделением избыточной тепловой мощности от 20 до 65 Вт. Интегральная наработка избыточной энергии на этом реакторе около 100 МДж.

Этот реактор имел нагреватель из вольфрамового провода, расположенный внутри герметичной керамической трубы. Топливо (1,8 г порошка никеля, смешанного с 0,2 г алюмогидрида лития) находилось в керамической трубке, обвитой вольфрамовым нагревателем.

Реактор «Проток 6» после вскрытия.



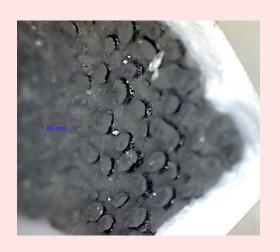
После вскрытия реактора было обнаружено, что внутренняя поверхность внешней трубки вблизи нагревателя покрылась серым бугристым стекловидным налетом. Топливо приобрело вид стекловидной массы с вкраплениями металлических шариков размером около 0,1 мм. Несколько шариков имели диаметр до 1 мм. На концах засыпки топливо приобрело вид спекшейся массы, содержащей мелкие металлические шарики. Помимо этого, в пространстве между внутренней и внешней трубками появилось вещество в виде порошка и ваты.

Исходная топливная смесь, металлический шарик из отработавшего топлива, топливо на краю активной зоны, образовавшееся вещество, налет на внутренней поверхности наружной трубки были подвергнуты масс-спектроскопическому анализу в ГеоХи РАН методом ICP-MS

Реактор после извлечения из калориметра

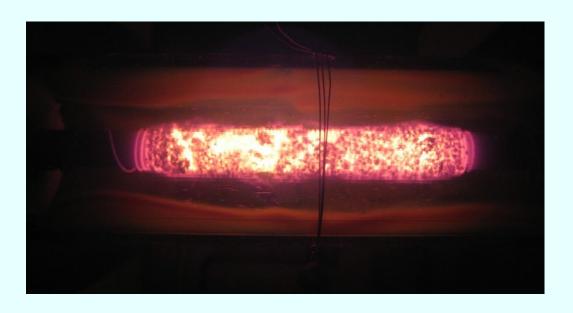


На стенке реактора

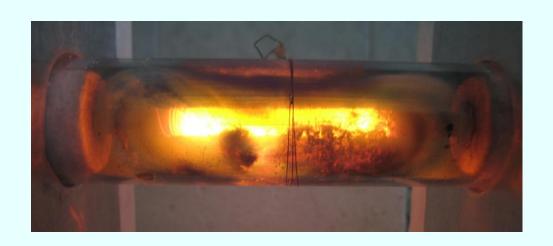


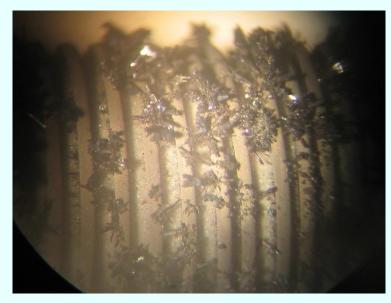




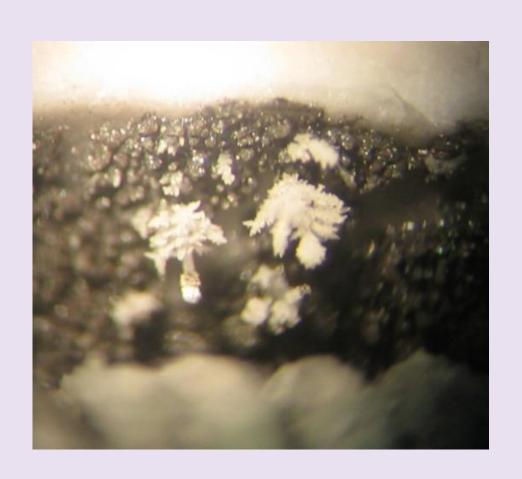


Рост кристаллов на вольфрамовых нагревателях





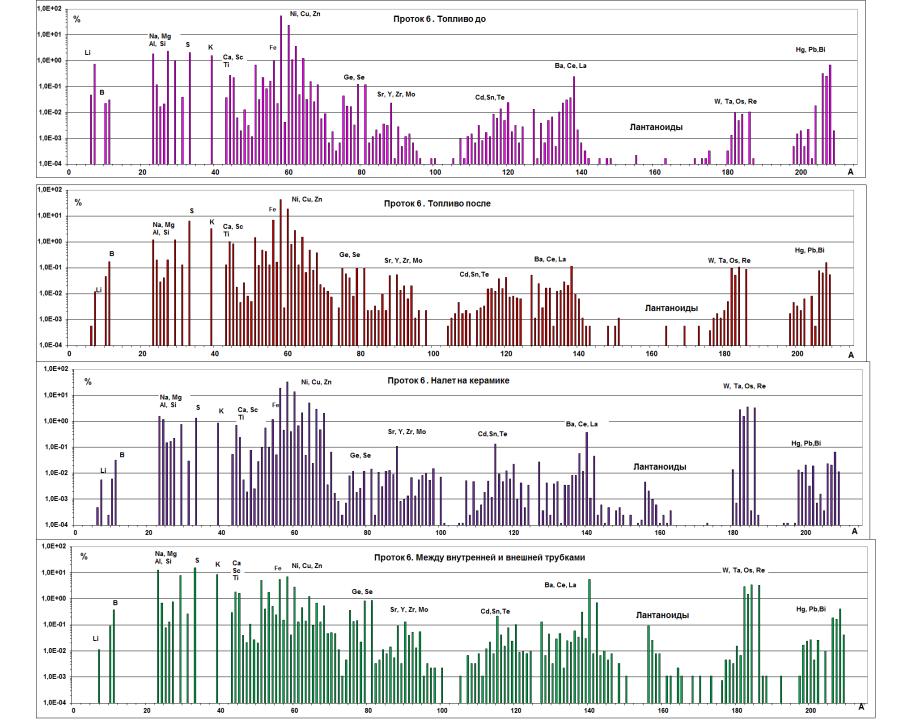
Удивительные кристаллы





Относительное содержание нуклидов (атомные %) в топливе и около активной зоны реактора «Проток-6» до и после работы реактора. Показаны нуклиды с содержанием >0,1%.

		До ра	боты в реан	сторе					Пос	ле работы в ре	еакторе			
Топливо ис	ходное		Керам	ика	W про	вод	Метаплическая капля в отработавшем топливе		Налет на внутреннй поверхности наружной керамической трубки		Вещество, накопившееся между внутренней и наружной трубками.			
7Li	0,74		23Na	7,03	23Na	5,37	118	0,19	23Na	1,56	11B	0,44	75As	0,43
23Na	1,90		24Mg	1,61	24Mg	0,25	23Na	5,07	24Mg	1,16	23Na	14,7	76Ge,Se	0,16
24Mg	0,12		25Mg	0,23	27AI	0,31	24Mg	0,21	25Mg	0,15	24Mg	0,82	77Se	0,17
27AI	3,63		26Mg	0,28	29Si	1,88	27AI	0,22	26Mg	0,17	26Mg	0,15	79Br	0,97
29Si	1,04		27AI	65,05	31P	0,18	29Si	3,94	27AI	0,23	27AI	0,92	81Br	1,03
39K	1,60		29Si	1,55	39K	6,09	31P	0,14	29Si	0,77	29Si	9,37	90Zr	0,16
44Ca	0,28		31P	0,16	44Ca	1,06	39K	3,51	39K	0,86	31P	0,32	115lnSn	0,26
45Sc	0,22		39K	8,36	45Sc	0,80	43Ca	0,14	44Ca	0,71	39K	9,89	120Sn,Te	0,12
51V	0,68		44Ca	0,94	54Cr	0,40	44Ca	1,08	45Sc	0,24	43Ca	0,35	1271	0,15
53Cr	0,22		45Sc	0,61	56Fe	10,46	45Sc	0,91	51V	0,10	44Ca	2,15	138Ba,La,Ce	0,36
55Mn	0,17		48Ti,Ca	0,15	182W	18,50	51V	1,56	52Cr	0,57	45Sc	1,95	140Ce	6,54
56Fe	0,99		54Cr	0,41	183W	9,52	52Cr	0,14	53Cr	0,10	48Ti,Ca	0,13	142Ce,Nd	0,85
58Fe,Ni	55,91		56Fe	10,00	184W	21,48	53Cr	0,51	54Cr	1,17	51V	6,08	182W	3,50
60Ni	23,58		58Fe,Nii	0,15	186W,Os	21,29	54Cr	0,46	56Fe	19,1	52Cr	0,48	183W	1,77
61Ni	1,10		89Y	0,25	200Hg	0,20	55Mn	0,14	57Fe	0,45	53Cr	2,07	184W,Os	4,09
62Ni	3,63		90Zr	0,44	202Hg	0,21	56Fe	7,36	:58Fe,Ni	32,31	54Cr	0,61	186W,Os	3,82
64Ni,Zn	1,24		92Sr,Mo	0,16	198Hg	0,21	57Fe	0,18	59Co	0,40	55Mn	0,28	206Pb	0,21
66Zn	0,16		94Sr,Mo	0,16			:58Fe,Ni	45,07	60Ni	13,93	56Fe	6,48	207Pb	0,19
68Zn	0,12		138 Ba,Ce	0,33			60Ni	19,81	61Ni	0,68	57Fe	0,18	208Pb	0,49
79Br	0,13		206Pb	0,13			61Ni	0,86	62Ni.	2,10	58Fe,Ni	8,25		
81Br	0,12		208Pb	0,29			62Ni	2,97	64Ni,Zn	5,06	60Ni	3,30		
138Ba,La,Ce	0,25						63Cu	0,14	66Zn	2,88	61Ni	0,15		
206Pb	0,32						64Ni,Zn	1,62	67Zn	0,47	62Ni	0,54		
207Pb	0,25						66Zn	0,52	68Zn	2,02!	63Cu	0,17		
208Pb	0,69						68Zn	0,40	88Sr	0,11	64Ni,Zn	1,48		
							75As	0,15	115lnSn	0,13	66Zn	0,81		
							79Br	0,35	140Ce	0,37	67Zn	0,15		
							81Br	0,36	182W	2,81	68Zn	0,63		
							138Ba,La,Ce	0,14	183W	1,54				
							184W,Os	0,12	184W,Os	3,52				
							208Pb	0,17	186W,Os	3,24				



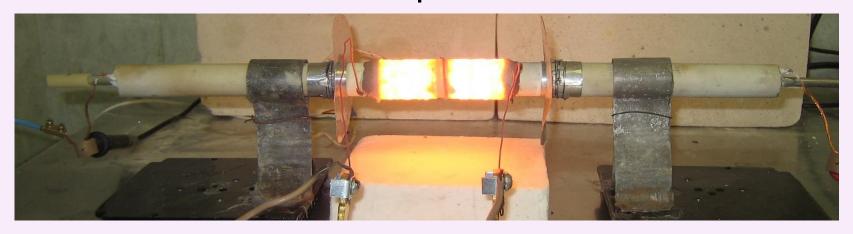
Очевидным результатом изотопного анализа является возрастание содержания многих нуклидов по сравнению с их содержанием в исходном топливе и конструкционных материалах. Сильно возросло содержание бора, железа, галлия, церия, циркония, стронция, висмута. Наиболее значительные аномалии обнаружены в порошке, накопившемся в пространстве между внутренней и наружными трубками. Особенно много появилось ¹⁴⁰Се: 6,3% (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

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

%	⁵⁸ Ni	⁶⁰ Ni	⁶¹ Ni	⁶² Ni	⁶⁴ 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

Так как данные по 64 Ni ненадежны из-за неконтролируемой добавки 64 Zn, при составлении таблицы для доли 64 Ni было принято природное значение

Реактор ВВ3



Реактор ВВЗ, помимо внутреннего нагревателя, имел второй нагреватель, обвивающий наружную керамическую трубку. В качестве топлива 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.



Топливо после работы в реакторе BB3

В ГеоХи РАН был сделан анализ топлива методом ICP-MS, причем отдельно делались анализы поверхностного и более глубокого слоев. Частично результаты анализа показаны в таблице 4. В ней, помимо данных для образцов, извлеченных из реактора после его работы, дана информация о содержании изотопов в исходном топливе, включая внедренные в него вольфрамовые проволочки.

До работы в реакторе		После работы в реакторе										
Топливо исхо	дное	Поверхн	ность	Повер	охность	Более глубокое растворение						
7Li	0,60	10B	0,15	75As	0,17	10B	0,14					
23Na	2,61	11B	0,67	79Br	0,11	11B	0,66					
24Mg	0,15	24Mg	1,50	81Br	0,21	23Na	3,72					
27AI	2,93	25Mg	0,12	88Sr	0,23	27AI	1,02					
29Si	1,22	26Mg	0,27	90Zr	0,20	28Si	0,25					
39K	2,52	27AI	1,14	107Ag	1,13	51∨	2,14					
44Ca	0,44	28Si	0,54	109Ag	2,01	52Cr	0,30					
45Sc	0,34	44Ca	0,16	1271	0,43	53Cr	0,73					
51V	0,55	45Sc	0,18	140Ce	0,72	54Cr	0,21					
53Cr	0,18	:51V	2,41	182W	3,34	56Fe	2,55					
55Mn	0,14	52Cr	0,31	183W	1,61	58Fe,Ni	44,47					
56Fe	2,92	53Cr	0,81	184W,Os	3,39	60Ni	18,23					
58Fe,Ni	45,09	56Fe	0,42	185Re	0,26	61Ni	0,87					
60Ni	19,01	58Fe,Ni	46,08	186W,Os	2,91	62Ni	2,83					
61Ni	0,88	60Ni	19,34	187Re,Os	0,60	64Ni,Zn	0,87					
62Ni	2,93	61Ni	0,96	206Pb	0,18	75As	0,12					
64Ni,Zn	1,00	62Ni	3,02	207Pb	0,13	79Br	0,19					
66Zn	0,13	63Cu	0,39	208Pb	0,34	81Br	0,19					
68Zn	0,10	64Ni,Zn	1,31			90Zr	0,39					
79Br	0,10	65Cu	0,16			92Sr,Mo	0,14					
81Br	0,10	66Zn	0,37			94Sr,Mo	0,16					
138Ba,La,Ce	0,20	68Zn	0,20			107Aq	1,37					
182W	3,73					109Ag	1,39					
183W	1,92					140Ce	0,78					
184W	4,33					142Ce,Nd	0,10					
186W,Os	4,29					182W	3,49					
206Pb	0,26					183W	1,90					
207Pb	0,20					184W,Os	4,17					
208Pb	0,56					185Re	0,38					
						186W,Os	3,72					
					1	187Re,Os	0,60					
	i					208Pb	0,17					

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

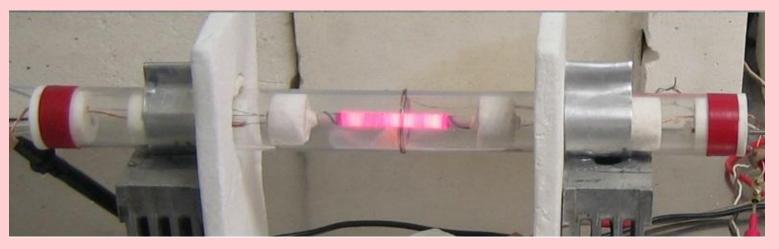
Содержание нуклидов в топливе в результате пребывания в реакторе изменилось. Особенно сильно возросло содержание бора, ванадия, церия, серебра.

Соотношение изотопов никеля в топливе ВВЗ до и после работы реактора

%	58 Ni	∞Ni	⁶¹ Ni	⁶² Ni	⁶⁴ 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

Данные по исследованным образцам, хотя и несколько отличаются от природного соотношения, между собой различаются незначительно.

Реактор КВ3



Реактор КВЗ в начале работы

Реактор КВЗ работал с 20 декабря 2016 г до 31 января 2017 г. с избыточной мощностью 100-200 Вт. Интегральная наработка избыточного тепловыделения около 400 МДж.



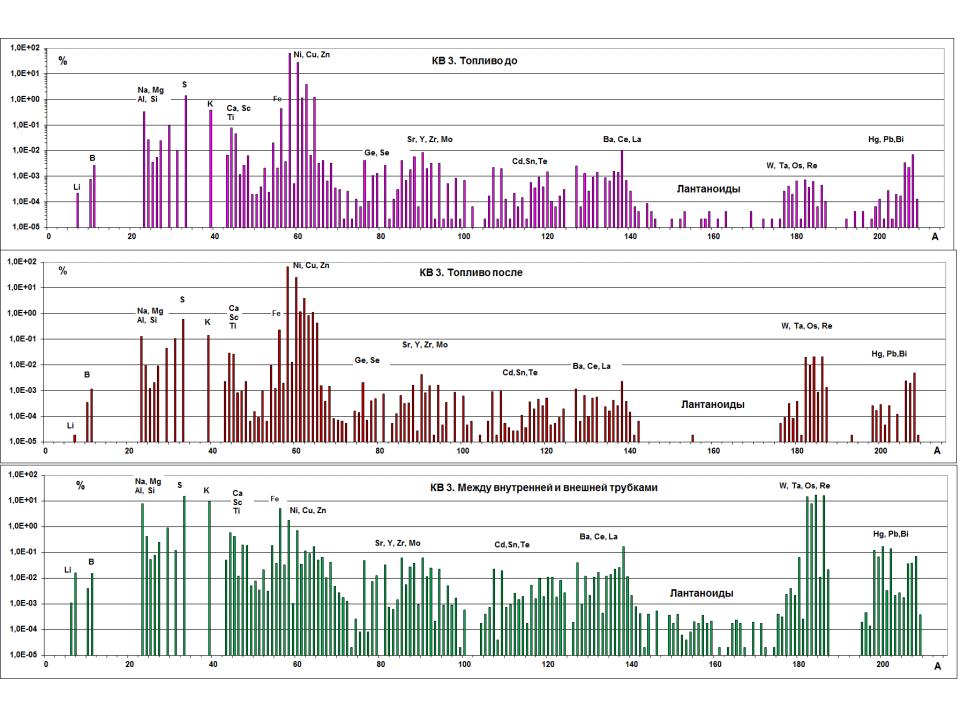
Реактор КВ3, вскрытый после окончания работы.

Топливо: порошок никеля массой 1,8 г без примеси алюмогидрида лития. Насыщение водородом осуществлялось путем выдерживания в газообразном водороде. Реактор имел не керамическую, а кварцевую внешнюю трубу. Нагреватель был сделан из сплава вольфрамрений.

Содержание нуклидов (атомные %) в топливе и около активной зоны реактора КВЗ до и после работы реактора. Показаны изотопы с содержанием > 0,1%.

		До работы в	реактор	e				После ра	боты в ре	акторе			После работы в реакторе							
Топливо	Гопливо исходное Керамика Провод нагревателя		Отработавш	ее топливо	Керамика				накопивше между вну	Вещество, накопившееся между внутренней и наружной трубками										
23Na	0,33	27AI	88,15	23Na	0,47	23Na	0,13	11B	0,13	64Ni,Zn	0,22	23Na	5,53							
39K	0,38	23Na	1,98	29Si	0,47	31P	0,13	23Na	15,6	66Zn	0,22	24Mg	0,50							
56Fe	0,35	24Mg	0,82	39K	0,40	39K	0,14	24Mg	1,06	76Ge,Se	0,20	27Al	0,32							
58Fe,Ni	64,49	25Mg	0,12	44Ca	0,12	56Fe	0,14	25Mg	0,13	88Sr	0,21	29Si	1,42							
60Ni	27,63	26Mg	0,14	56Fe	0,12	58Fe,Ni	65,39	26Mg	0,24	89Y	0,22	31P	0,16							
61Ni	1,18	29Si	0,37	58Fe,Ni	0,12	60Ni	26,15	27Al	6,05	90Zr	0,42	39K	6,93							
62Nij	3,88	39K	2,10	182W	20,24	61Ni	1,18	29Si	4,26	92Sr,Mo	0,22	44Ca	0,88							
64Ni,Zn	1,21	44Ca	0,21	183W	11,02	62Ni	3,99	39K	15,2	94Sr,Mo	0,17	45Sc	0,82							
		47Ti	0,88	184W,Os	24,39	63Cu	0,84	43Ca	0,26	109Ag	0,10	54Cr	0,26							
		48Ti,Ca	0,18	185Re	6,97	64Ni,Zn	1,14	44Ca	3,15	1271	0,16	56Fe	7,04							
		54Cr	0,14	186W,Os	22,23	65Cu	0,42	45Sc	2,04	138 Ba, Ce	0,39	58Fe,Ni	1,80							
		56Fe	3,17	187Re,Os	11,85			48Ti,Ca	0,23	182W	4,32	60Ni	0,74							
		.58Fe,Ni	0,28	198Hg,Pt	0,12			51V	0,22	183W	3,35	62Nij	0,10							
		60Ni	0,11	200Hg	0,14			54Cr	0,96	184W	5,01.	63Cu	0,13							
		89Y	0,13	202Hg	0,13			55Mn	0,10	185Re	5,95	64Ni,Zn	0,15							
		138 Ba, Ce	0,17	208Pb	0,18			56Fe	21,1	186W,Os	4,77	182W	18,29							
		İ		İ				57Fe	0,15	203Tl	0,15	183W	10,44							
		— В прості	ранстви	е между вн	IVTDEHHE	й и наружн	ЮЙ	58Fe,Ni	0,91	206Pb	0,15	184W	21,38							
								60Ni	0,37	207Pb	0,15	186W,Os	20,90							
	трубками появилось много вольфрама. Помимо вольфрама, здесь накопилось много железа,							63Cu	0,14	208Pb	0,40	198Hg	0,17							
		• •		-								200Hg	0,20							
	натрия, калия, никеля, кремния, кальция, скандия и ряда других элементов.					TIPE VITE					202Hg	0,18								
		- Рида др	J. 11 7 331	CINCITION.								208Pb	0,15							

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



Относительное содержание нуклидов (атомные %) в керамической трубке до и после работы реактора КВ3.

Показаны нуклиды, содержание которых возросло более чем в 10 раз.

	До	После	После/до		До	После	После/до
		÷					***************************************
10B	0,0008	0,0318	41,8	114Cd,Sn	0,0005	0,0064	11,9
11B	0,0054	0,1277	23,4	116Cd,Sn	0,0022	0,0275	12,8
29Si	0,3709	4,2603	11,5	117Sn	0,0011	0,0129	12,0
43Ca	0,0158	0,2638	16,7	118Sn	0,0024	0,0422	17,9
44Ca	0,2123	3,1461	14,8	119Sn	0,0014	0,0165	11,7
45Sc	0,0507	2,0384	40,2	120Sn,Te	0,0034	0,0670	19,5
46Ti,Ca	0,0074	0,0836	11,3	119Sn	0,0014	0,0165	11,7
51V	0,0028	0,2151	78,0	122Te	0,0007	0,0101	15,0
53Cr	0,0057	0,0753	13,3	127	0,0062	0,1589	25,7
64Ni,Zn	0,0186	0,2224	12,0	128Te	0,0002	0,0046	22,8
66Zn	0,0099	0,1102	11,1	124Te	0,0008	0,0092	11,4
67 Zn	0,0014	0,0211	15,0	130Te	0,0006	0,0101	16,7
68Zn	0,0080	0,0808	10,1	182W	0,0076	4,3168	567,8
72Ge	0,0001	0,0037	27,2	183W	0,0035	2,3489	671,7
75As	0,0001	0,0138	102,2	184W	0,0076	5,0087	658,8
76Ge,Se	0,0115	0,1976	17,2	185Re	0,0006	5,9469	9827,0
77Se	0,0001	0,0055	82,2	186W,Os	0,0089	4,7748	537,6
78Se,Kr	0,0028	0,0542	19,7	198Hg	0,0001	0,0321	238,5
79Br	0,0028	0,0560	20,3	199Hg	0,0007	0,0248	33,5
81Br	0,0040	0,0790	19,6	200Hg	0,0004	0,0560	138,9
83Kr	0,0001	0,0009	13,7	202Hg	0,0005	0,0606	128,8
107Ag	0,0067	0,0863	13,0	203TI	0,0015	0,1498	101,2
109Ag	0,0071	0,1020	14,3	204Pb,Hg	0,0010	0,0101	10,0
113Cd,In	0,0001	0,0009	13,7				

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

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

%	⁵⁸ Ni	⁶⁰ Ni	⁸¹ Ni	⁶² Ni	⁶⁴ 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

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.

выводы

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.

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

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.

В веществе, накопившемся в полости реакторов вблизи активной зоны, помимо вольфрама, накопилось много железа, натрия, калия, никеля, кремния, кальция, скандия и ряда других элементов.

Публикации по теме доклада

Пархомов А.Г, Алабин К.А., Андреев С.Н., Забавин С.Н., Соболев А.Г., Тимербулатов Т.Р. *Никель-водородные реакторы: тепловыделение*, изотоный и элементный состав. РЭНСИТ, т.9, №1, 2017, с. 74-93

Пархомов А.Г, Алабин К.А., Андреев С.Н., Забавин С.Н., Соболев А.Г., Тимербулатов Т.Р. *Анализ изменений изотопного и элементного состава в высокотемпературных никель-водородных реакторах*. Прикладная физика и математика, \mathbb{N} 4, 2017, с. 9-19

Пархомов А.Г, Алабин К.А., Андреев С.Н., Забавин С.Н., Соболев А.Г., Тимербулатов Т.Р. *Изменения изотопного и элементного состава в высокотемпературных никель-водородных реакторах.* ЖФНН, т.5, № 15-16, 2017. http://www.unconv-science.org/pdf/15/parkhomov-ru.pdf