Анализ изменений изотопного и элементного состава в высокотемпературных никель-водородных реакторах

А.Г. Пархомов[1], К.А. Алабин[2], С.Н. Андреев[2],

С.Н. Забавин[1], А.Г.Соболев[3], Т.Р.Тимербулатов[1]

[1]ОКЛ КИТ, Москва

[2]ИОФ РАН, Москва

[3]ФИАН РАН, Москва

В настоящее время создано немало устройств, выделяющих 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.

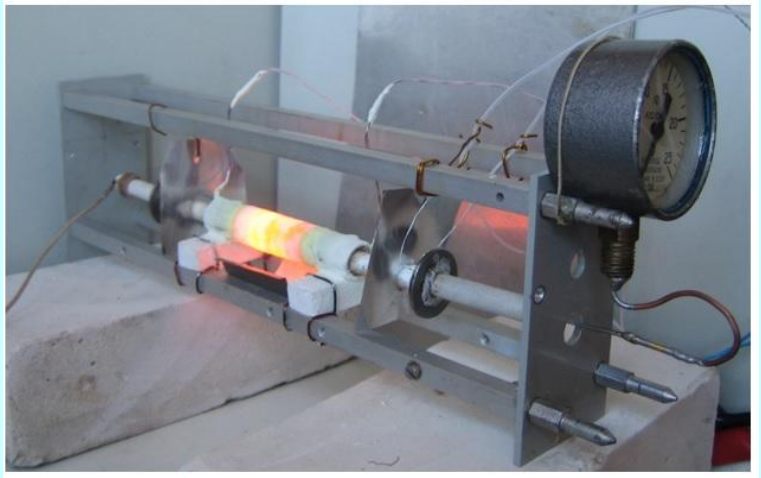
Оценки показывают, что если аномальное тепловыделение действительно связано изменениями на ядерном уровне, появление нуклидов, *изначально отсутствующих* в исходном топливе, может быть обнаружено при наработках избыточной энергии порядка 1 МДж на грамм топлива.

Для надежного выявления изменений соотношений изотопов в элементах, *изначально входящих* в состав топлива, требуются наработки избыточной энергии порядка1000 МДж/*г*. Закономерно, что даже тщательный анализ топлива реакторов с недостаточной наработкой избыточной энергии не обнаруживает изменений.

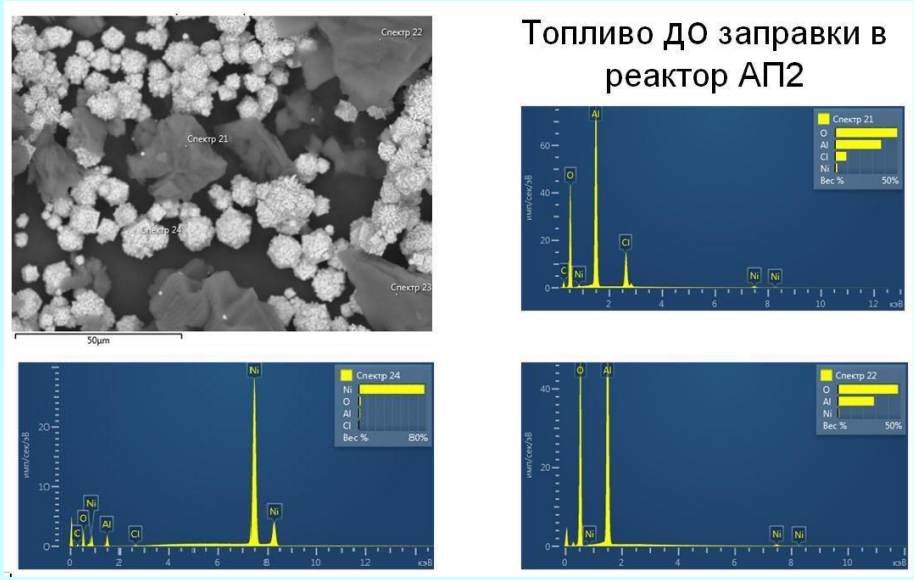
Наработка избыточной энергии в высокотемпературном теплогенераторе Росси, составила 5800 МДж/*г*. Этого вполне достаточно для радикальных изменений изотопного состава топлива

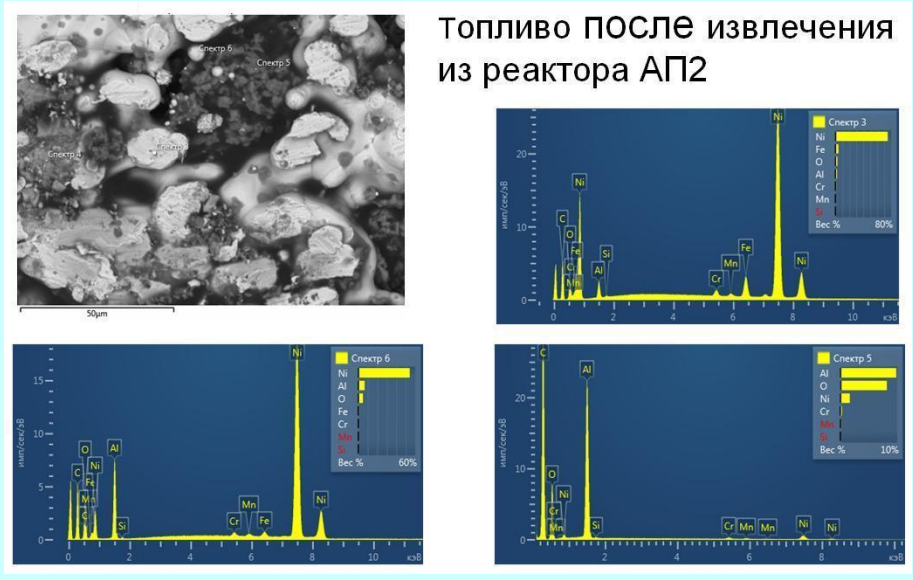
В этом докладе представлена информация о результатах анализа изменений в топливе и в конструкционных материалах, происшедших в нескольких никель-водородных реакторах, созданных нашим коллективом.

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.

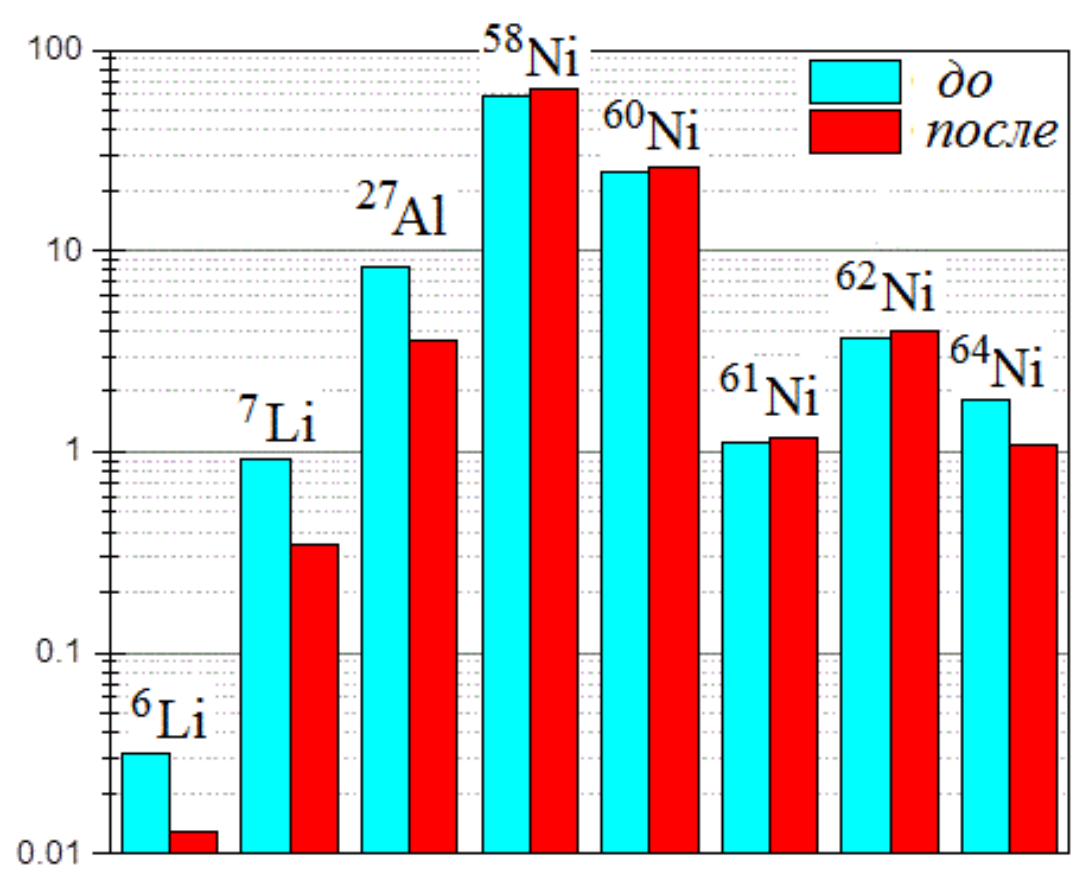




Анализ элементного состава с использованием электронного сканирующего микроскопа (ИОФ РАН)

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

% атомные			
Элемент	До	После	После/до
B	0,034	0,036	1,05
C	3,82	8,22	2,15
O	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
P	0,0026	0,0041	1,57
S	0,0056	0,0084	1,50
Cl	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
V	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

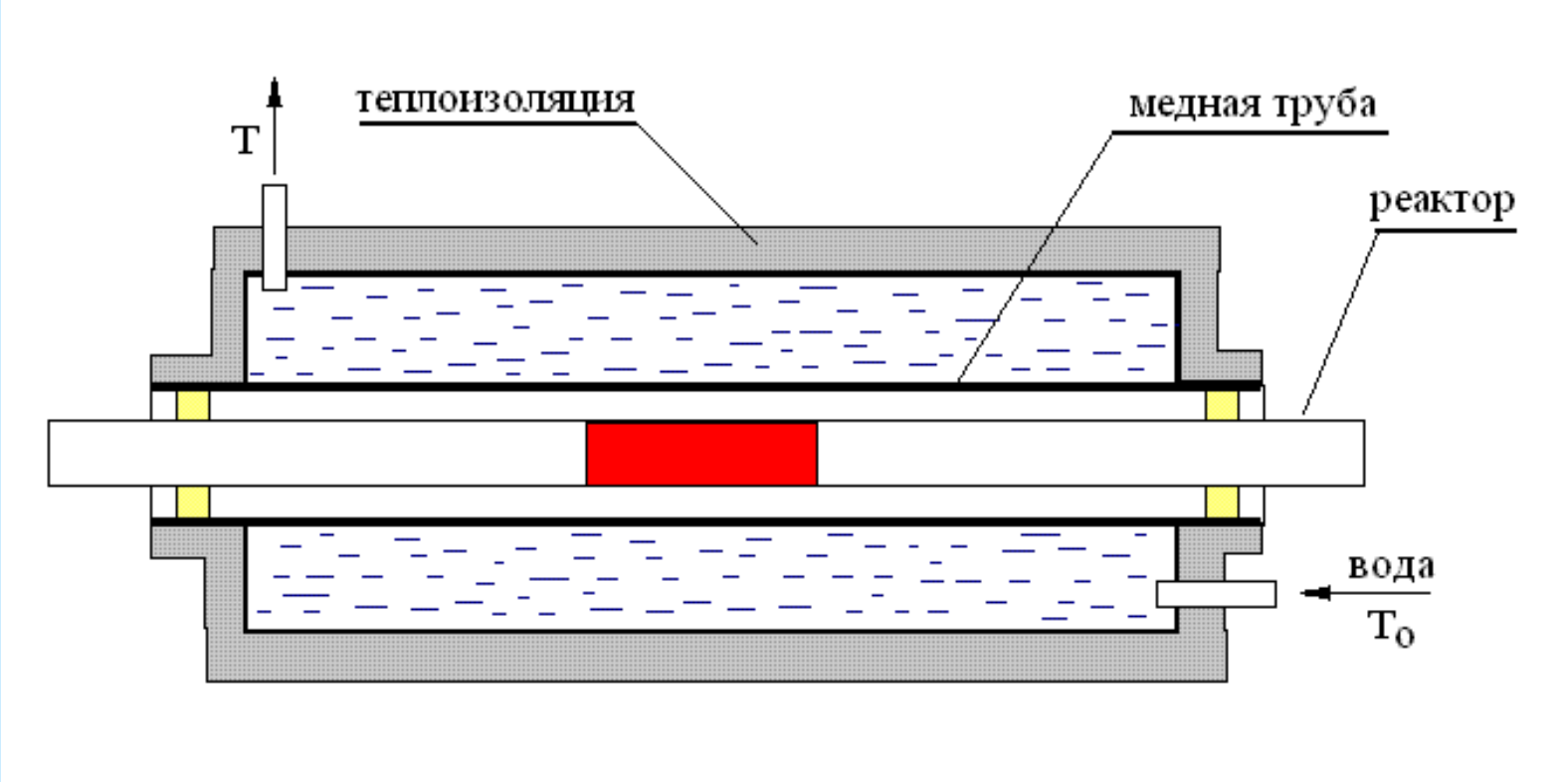
в ГеоХи РАН

%	^{6}Li	^{7}Li		^{58}Ni	^{60}Ni	^{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}Ni	^{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**

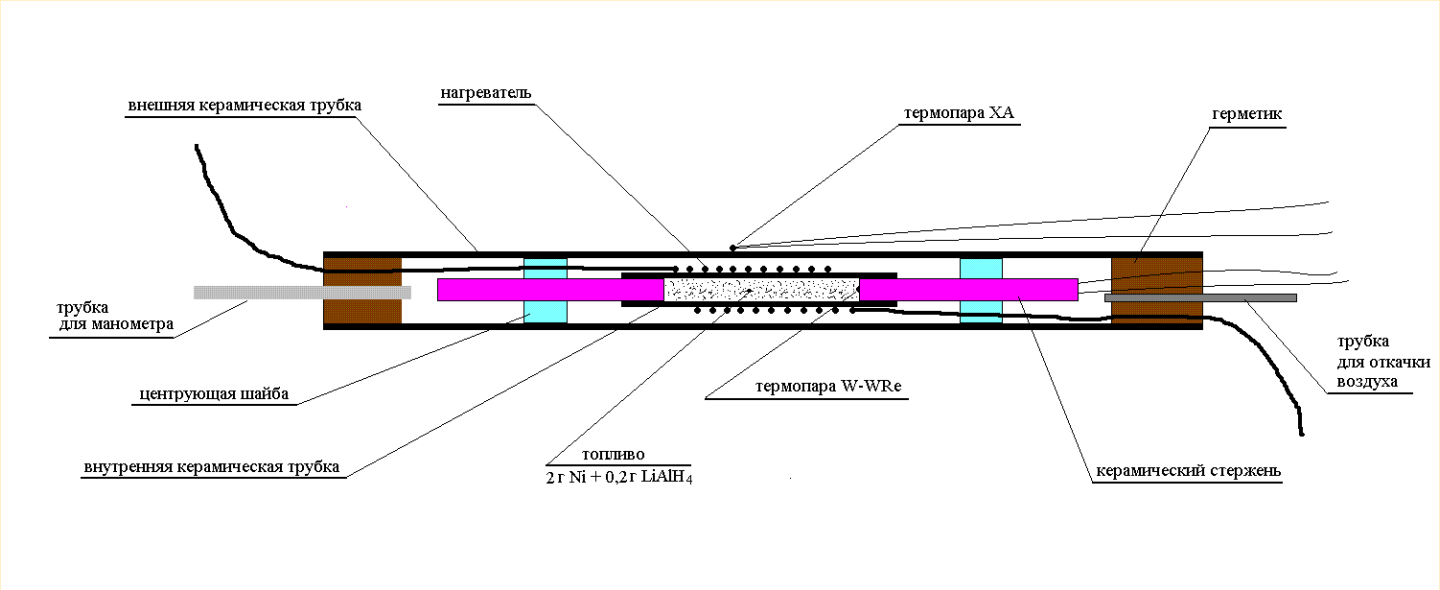
Устройство проточного калориметра



Мощность тепловыделения $W = c(dm/dt)(T-T_o)(1+\alpha)$

c – удельная теплоемкость воды,
(dm/dt) – масса воды, протекающей в секунду,
α - поправка на потери тепла,
T_o – температура на входе в калориметр, T- температура на выходе.

Конструкция реакторов, испытанных в проточном калориметре



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

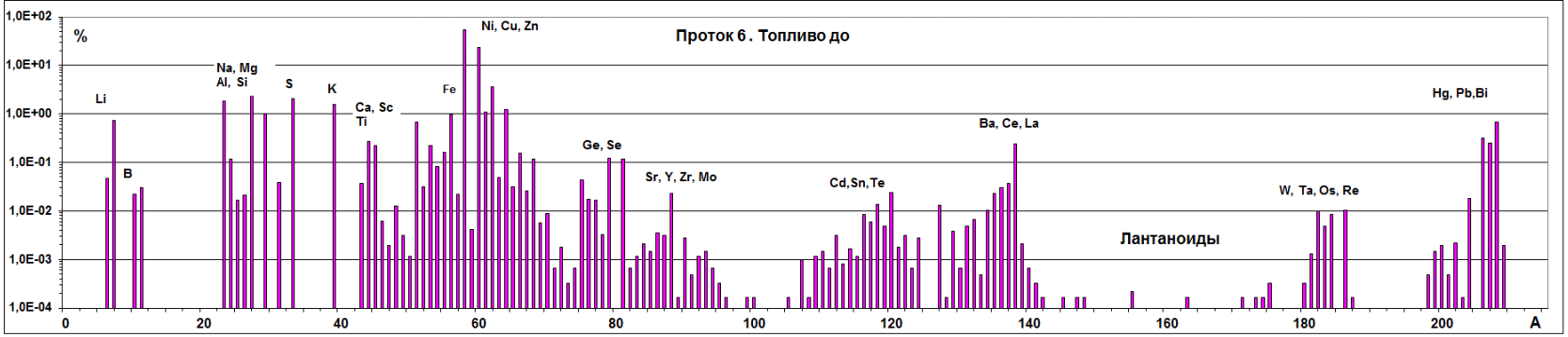
Относительное содержание нуклидов (атомные %) в топливе и около активной зоны реактора «Проток-6» до и после работы реактора. Показаны нуклиды с содержанием >0,1%.

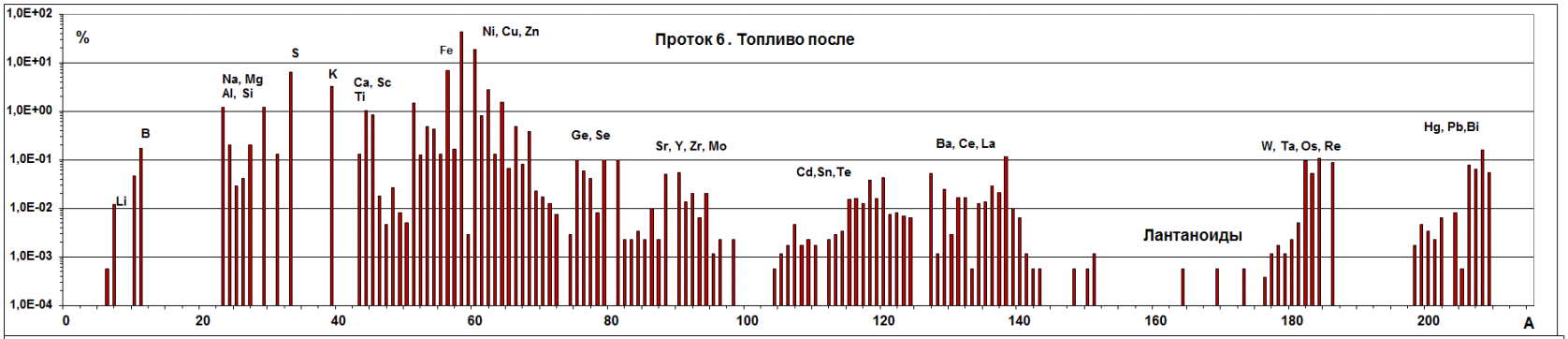
До работы в реакторе

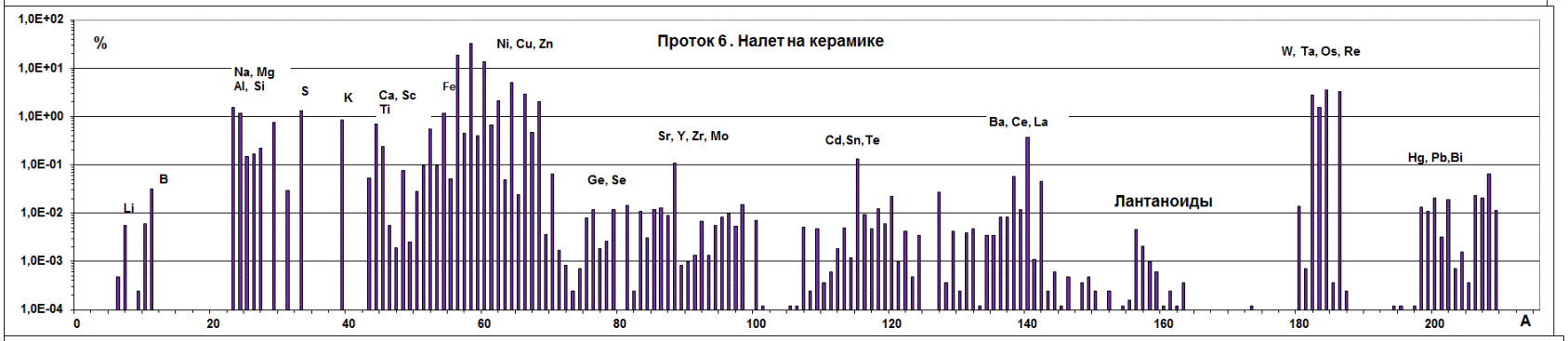
Топливо исходное		Керамика		W провод	
7Li	0,74	23Na	7,03	23Na	5,37
23Na	1,90	24Mg	1,61	24Mg	0,25
24Mg	0,12	25Mg	0,23	27Al	0,31
27Al	3,63	26Mg	0,28	29Si	1,88
29Si	1,04	27Al	65,05	31P	0,18
39K	1,60	29Si	1,55	39K	6,09
44Ca	0,28	31P	0,16	44Ca	1,06
45Sc	0,22	39K	8,36	45Sc	0,80
51V	0,68	44Ca	0,94	54Cr	0,40
53Cr	0,22	45Sc	0,61	56Fe	10,46
55Mn	0,17	48Ti,Ca	0,15	182W	18,50
56Fe	0,99	54Cr	0,41	183W	9,52
58Fe,Ni	55,91	56Fe	10,00	184W	21,48
60Ni	23,58	58Fe,Ni	0,15	186W,Os	21,29
61Ni	1,10	89Y	0,25	200Hg	0,20
62Ni	3,63	90Zr	0,44	202Hg	0,21
64Ni,Zn	1,24	92Sr,Mo	0,16	198Hg	0,21
66Zn	0,16	94Sr,Mo	0,16		
68Zn	0,12	138 Ba,Ce	0,33		
79Br	0,13	206Pb	0,13		
81Br	0,12	208Pb	0,29		
138Ba,La,Ce	0,25				
206Pb	0,32				
207Pb	0,25				
208Pb	0,69				

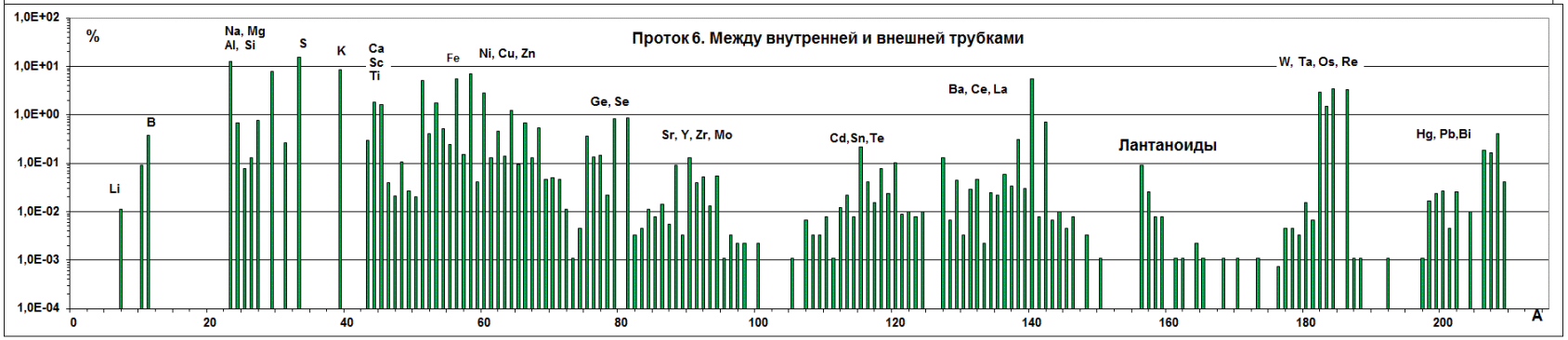
После работы в реакторе

Металлическая капля в отработавшем топливе		Налет на внутренний поверхности наружной керамической трубки		Вещество, накопившееся между внутренней и наружной трубками.			
11B	0,19	23Na	1,56	11B	0,44	75As	0,43
23Na	5,07	24Mg	1,16	23Na	14,7	76Ge,Se	0,16
24Mg	0,21	25Mg	0,15	24Mg	0,82	77Se	0,17
27Al	0,22	26Mg	0,17	26Mg	0,15	79Br	0,97
29Si	3,94	27Al	0,23	27Al	0,92	81Br	1,03
31P	0,14	29Si	0,77	29Si	9,37	90Zr	0,16
39K	3,51	39K	0,86	31P	0,32	115InSn	0,26
43Ca	0,14	44Ca	0,71	39K	9,89	120Sn,Te	0,12
44Ca	1,08	45Sc	0,24	43Ca	0,35	127I	0,15
45Sc	0,91	51V	0,10	44Ca	2,15	138Ba,La,Ce	0,36
51V	1,56	52Cr	0,57	45Sc	1,95	140Ce	6,54
52Cr	0,14	53Cr	0,10	48Ti,Ca	0,13	142Ce,Nd	0,85
53Cr	0,51	54Cr	1,17	51V	6,08	182W	3,50
54Cr	0,46	56Fe	19,1	52Cr	0,48	183W	1,77
55Mn	0,14	57Fe	0,45	53Cr	2,07	184W,Os	4,09
56Fe	7,36	58Fe,Ni	32,31	54Cr	0,61	186W,Os	3,82
57Fe	0,18	59Co	0,40	55Mn	0,28	206Pb	0,21
58Fe,Ni	45,07	60Ni	13,93	56Fe	6,48	207Pb	0,19
60Ni	19,81	61Ni	0,68	57Fe	0,18	208Pb	0,49
61Ni	0,86	62Ni	2,10	58Fe,Ni	8,25		
62Ni	2,97	64Ni,Zn	5,06	60Ni	3,30		
63Cu	0,14	66Zn	2,88	61Ni	0,15		
64Ni,Zn	1,62	67Zn	0,47	62Ni	0,54		
66Zn	0,52	68Zn	2,02	63Cu	0,17		
68Zn	0,40	88Sr	0,11	64Ni,Zn	1,48		
75As	0,15	115InSn	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				


Проток 6 . Топливо до
%
Li
B
Na, Mg
Al, Si
S
K
Ca, Sc
Ti
Fe
Ni, Cu, Zn
Ge, Se
Sr, Y, Zr, Mo
Cd,Sn,Te
Ba, Ce, La
Лантаноиды
W, Ta, Os, Re
Hg, Pb,Bi
A


Проток 6 . Топливо после
%
Li
B
Na, Mg
Al, Si
S
K
Ca, Sc
Ti
Fe
Ni, Cu, Zn
Ge, Se
Sr, Y, Zr, Mo
Cd,Sn,Te
Ba, Ce, La
Лантаноиды
W, Ta, Os, Re
Hg, Pb,Bi
A


Проток 6 . Налет на керамике
%
Li
B
Na, Mg
Al, Si
S
K
Ca, Sc
Ti
Fe
Ni, Cu, Zn
Ge, Se
Sr, Y, Zr, Mo
Cd,Sn,Te
Ba, Ce, La
Лантаноиды
W, Ta, Os, Re
Hg, Pb,Bi
A


Проток 6. Между внутренней и внешней трубками
%
Li
B
Na, Mg
Al, Si
S
K
Ca
Sc
Ti
Fe
Ni, Cu, Zn
Ge, Se
Sr, Y, Zr, Mo
Cd,Sn,Te
Ba, Ce, La
Лантаноиды
W, Ta, Os, Re
Hg, Pb,Bi
A

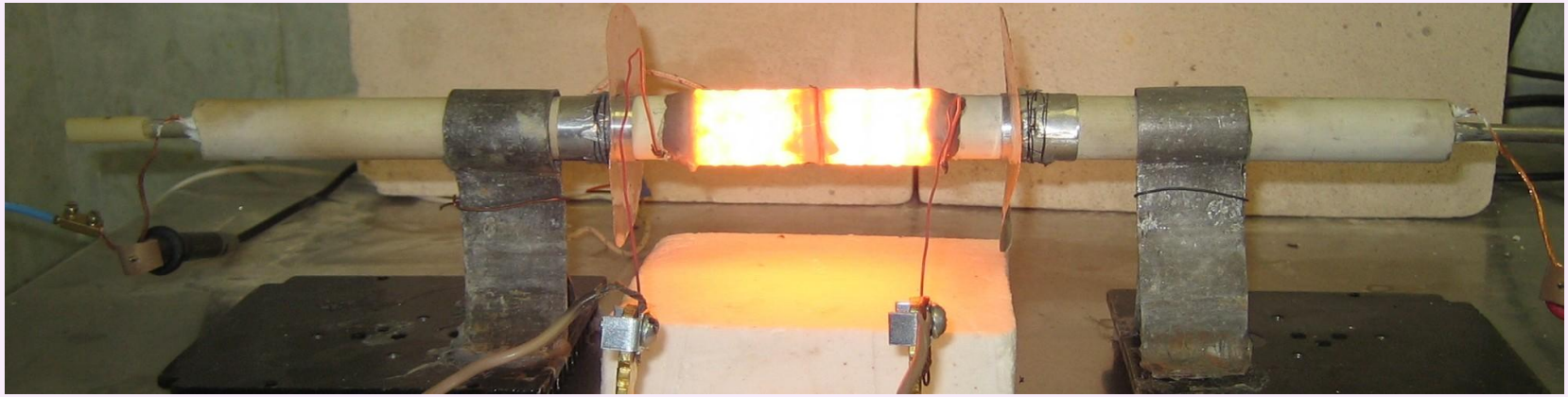
Очевидным результатом изотопного анализа является возрастание содержания многих нуклидов по сравнению с их содержанием в исходном топливе и конструкционных материалах. Сильно возросло содержание бора, железа, галлия, церия, циркония, стронция, висмута. Наиболее значительные аномалии обнаружены в порошке, накопившемся в пространстве между внутренней и наружными трубками. Особенно много появилось ^{140}Ce: 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 ВВ3, 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 ВВ3

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.

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

До работы в реакторе		После работы в реакторе					
Топливо исходное		Поверхность		Поверхность		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
27Al	2,93	25Mg	0,12	88Sr	0,23	27Al	1,02
29Si	1,22	26Mg	0,27	90Zr	0,20	28Si	0,25
39K	2,52	27Al	1,14	107Ag	1,13	51V	2,14
44Ca	0,44	28Si	0,54	109Ag	2,01	52Cr	0,30
45Sc	0,34	44Ca	0,16	127I	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			107Ag	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
						187Re,Os	0,60
						208Pb	0,17

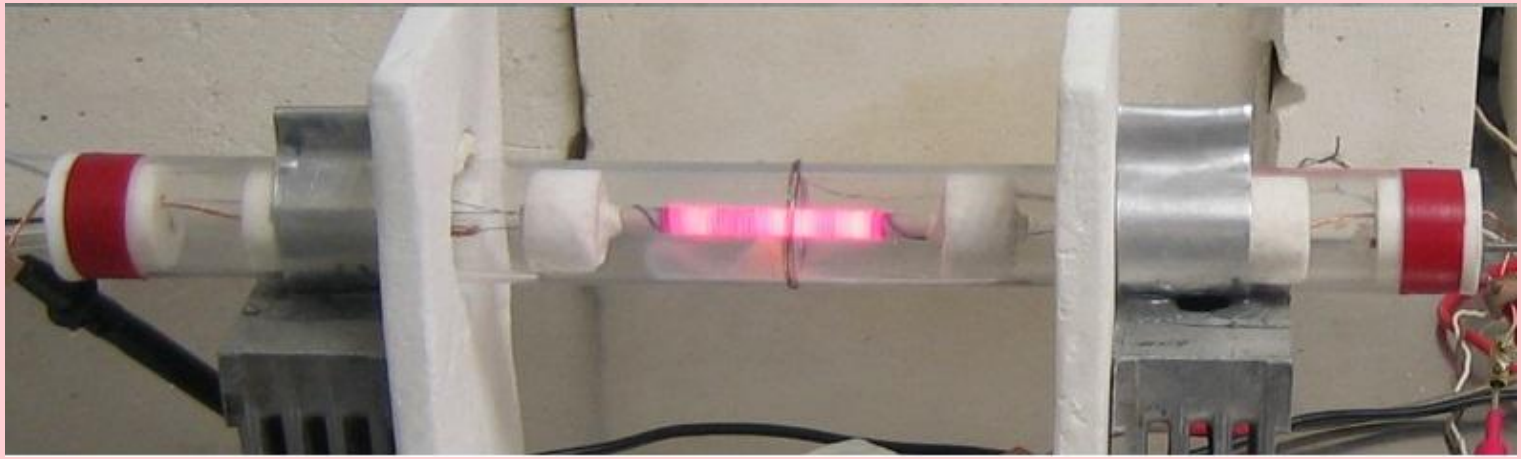
Содержание нуклидов в топливе в результате пребывания в реакторе изменилось. Особенно сильно возросло содержание бора, ванадия, церия, серебра.

Соотношение изотопов никеля в топливе ВВЗ до и после работы реактора

%	^{58}Ni	^{60}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 КВ3 в начале работы

Реактор КВ3 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 вольфрам-рений.

Содержание нуклидов (атомные %) в топливе и около активной зоны реактора КВ3 до и после работы реактора. Показаны изотопы с содержанием > 0,1%.

До работы в реакторе

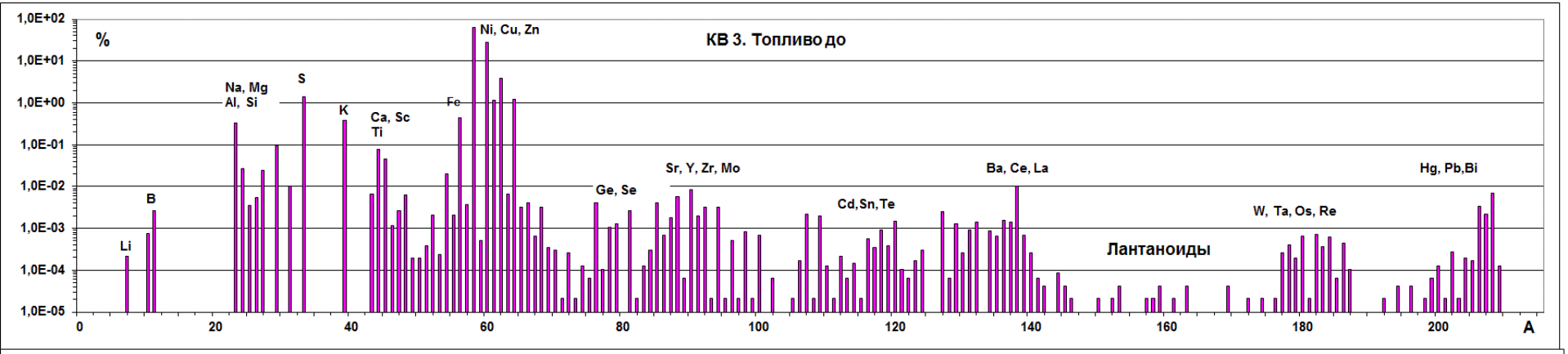
Топливо исходное		Керамика		Провод нагревателя	
23Na	0,33	27Al	88,15	23Na	0,47
39K	0,38	23Na	1,98	29Si	0,27
56Fe	0,45	24Mg	0,82	39K	0,40
58Fe,Ni	64,49	25Mg	0,12	44Ca	0,12
60Ni	27,63	26Mg	0,14	56Fe	0,21
61Ni	1,18	29Si	0,37	58Fe,Ni	0,12
62Ni	3,88	39K	2,10	182W	20,24
64Ni,Zn	1,21	44Ca	0,21	183W	11,02
		47Ti	0,88	184W,Os	24,39
		48Ti,Ca	0,18	185Re	6,97
		54Cr	0,14	186W,Os	22,23
		56Fe	3,17	187Re,Os	11,85
		58Fe,Ni	0,28	198Hg,Pt	0,12
		60Ni	0,11	200Hg	0,14
		89Y	0,13	202Hg	0,13
		138 Ba,Ce	0,17	208Pb	0,18

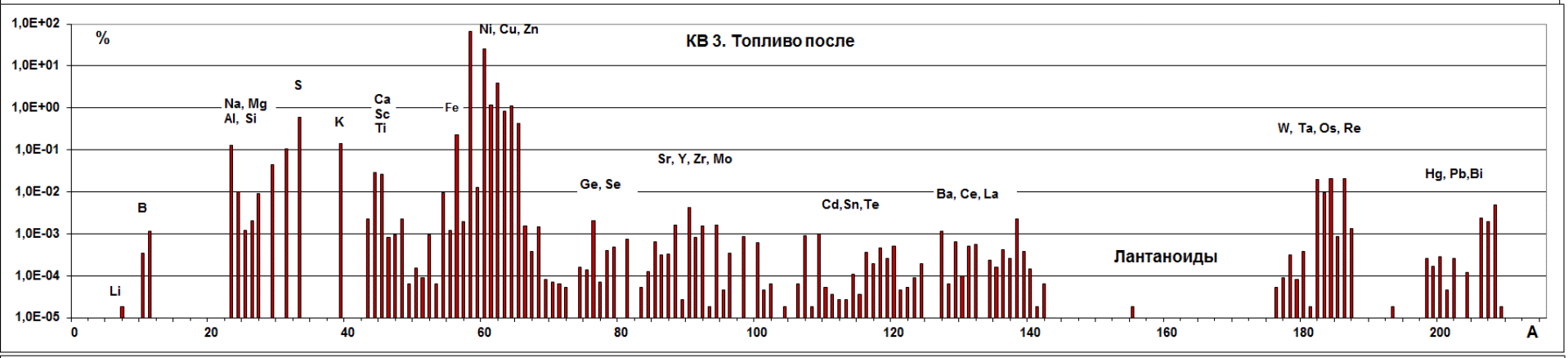
После работы в реакторе

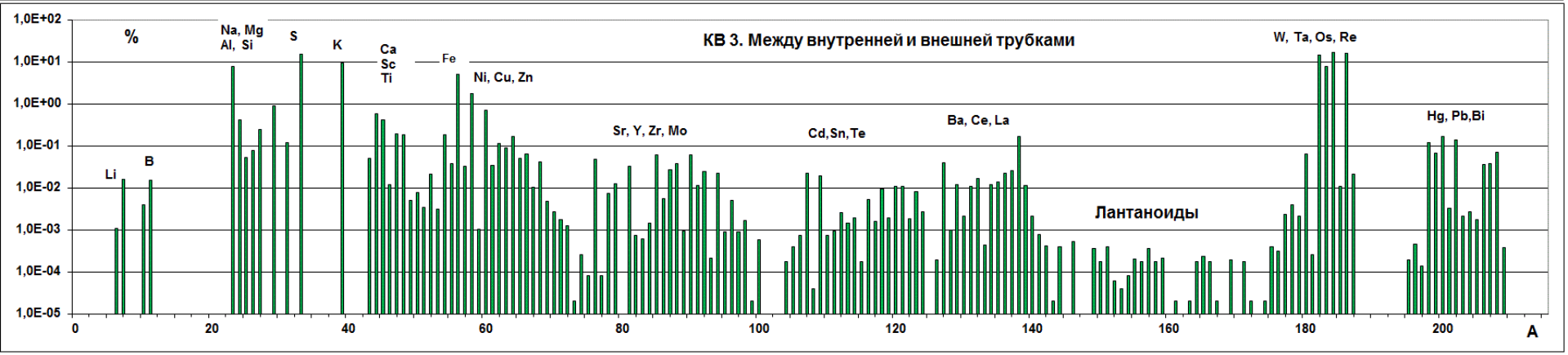
Отработавшее топливо		Керамика				Вещество, накопившееся между внутренней и наружной трубками	
23Na	0,13	11B	0,13	64Ni,Zn	0,22	23Na	5,53
31P	0,11	23Na	15,6	66Zn	0,11	24Mg	0,50
39K	0,14	24Mg	1,06	76Ge,Se	0,20	27Al	0,32
56Fe	0,23	25Mg	0,13	88Sr	0,21	29Si	1,42
58Fe,Ni	65,39	26Mg	0,24	89Y	0,22	31P	0,16
60Ni	26,15	27Al	6,05	90Zr	0,42	39K	6,93
61Ni	1,18	29Si	4,26	92Sr,Mo	0,22	44Ca	0,88
62Ni	3,99	39K	15,2	94Sr,Mo	0,17	45Sc	0,82
63Cu	0,84	43Ca	0,26	109Ag	0,10	54Cr	0,26
64Ni,Zn	1,14	44Ca	3,15	127 I	0,16	56Fe	7,04
65Cu	0,42	45Sc	2,04	138 Ba,Ce	0,39	58Fe,Ni	1,80
		48Ti,Ca	0,23	182W	4,32	60Ni	0,74
		51V	0,22	183W	3,35	62Ni	0,10
		54Cr	0,96	184W	5,01	63Cu	0,13
		55Mn	0,10	185Re	5,95	64Ni,Zn	0,15
		56Fe	21,1	186W,Os	4,77	182W	18,29
		57Fe	0,15	203Tl	0,15	183W	10,44
		58Fe,Ni	0,91	206Pb	0,15	184W	21,36
		60Ni	0,37	207Pb	0,15	186W,Os	20,90
		63Cu	0,14	208Pb	0,40	198Hg	0,17
						200Hg	0,20
						202Hg	0,18
						208Pb	0,15

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.


КВ 3. Топливо до
%
1,0E+02
1,0E+01
1,0E+00
1,0E-01
1,0E-02
1,0E-03
1,0E-04
1,0E-05
Li
B
Na, Mg
Al, Si
S
K
Ca, Sc
Ti
Fe
Ni, Cu, Zn
Ge, Se
Sr, Y, Zr, Mo
Cd,Sn,Te
Ba, Ce, La
Лантаноиды
W, Ta, Os, Re
Hg, Pb,Bi
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
A


КВ 3. Топливо после
%
1,0E+02
1,0E+01
1,0E+00
1,0E-01
1,0E-02
1,0E-03
1,0E-04
1,0E-05
Li
B
Na, Mg
Al, Si
S
K
Ca
Sc
Ti
Fe
Ni, Cu, Zn
Ge, Se
Sr, Y, Zr, Mo
Cd,Sn,Te
Ba, Ce, La
Лантаноиды
W, Ta, Os, Re
Hg, Pb,Bi
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
A


КВ 3. Между внутренней и внешней трубками
%
1,0E+02
1,0E+01
1,0E+00
1,0E-01
1,0E-02
1,0E-03
1,0E-04
1,0E-05
Li
B
Na, Mg
Al, Si
S
K
Ca
Sc
Ti
Fe
Ni, Cu, Zn
Sr, Y, Zr, Mo
Cd,Sn,Te
Ba, Ce, La
Лантаноиды
W, Ta, Os, Re
Hg, Pb,Bi
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
A

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 I	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		203Tl	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, в также нуклидов с атомными массами 43-53, 64-83, 107-130, 198-208.

Соотношение изотопов никеля в топливе и около активной зоны реактора КВ3 до и после работы реактора.

%	^{58}Ni	^{60}Ni	^{61}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.

Покажем принципиальную возможность ядерных трансмутаций, дающих столь богатое разнообразие возникающих нуклидов, не вникая в физические механизмы.

Сущность происходящих изменений состоит в том, что некоторый набор стабильных нуклидов переходит в другой набор стабильных нуклидов с выделением энергии. Так как при этом не излучаются наружу нейтроны или заряженные частицы, суммарное число нуклонов и суммарный заряд ядер остается неизменным.

Рассмотрим три простейшие разновидности таких преобразований:

синтез двух ядер в одно,

деление ядра на два,

преобразование пары ядер в другую пару.

279 стабильных нуклидов

A	Z	Элемент	атомная масса a.e.m.	атомная масса МэВ	%
1	1	H	1,007825	938,783	99,985
2	1	D	2,014102	1876,124	0,015
3	2	He	3,016030	2809,414	0,00013
4	2	He	4,002603	3728,401	99,9999
6	3	Li	6,015126	5603,054	7,42
7	3	Li	7,016005	6535,367	92,58
9	4	Be	9,012186	8394,798	100
10	5	B	10,012939	9326,994	19,6
11	5	B	11,009305	10255,103	80,4
12	6	C	12,000000	11177,929	98,89
13	6	C	13,003354	12112,548	1,11
14	7	N	14,003242	13043,937	99,63
15	7	N	15,000108	13972,512	0,37
16	8	O	15,994915	14899,169	99,759
17	8	O	16,999134	15834,593	0,037
18	8	O	17,999160	16766,111	0,204
195	78	Pt	194,964820	181608,580	33,8
196	78	Pt	195,964981	182540,224	25,3
198	78	Pt	197,967530	184405,586	7,21
197	79	Au	196,966552	183473,181	100
196	80	Hg	195,965822	182541,007	0,146
198	80	Hg	197,966800	184404,906	10,02
199	80	Hg	198,968256	185337,757	16,84
200	80	Hg	199,968344	186269,333	23,13
201	80	Hg	200,970315	187202,663	13,22
202	80	Hg	201,970630	188134,450	29,8
204	80	Hg	203,973482	190000,095	6,85
203	81	Tl	202,972331	189067,529	29,5
205	81	Tl	204,974462	190932,502	70,5
204	82	Pb	203,973069	189999,710	1,48
206	82	Pb	205,974446	191863,981	23,6
207	82	Pb	206,975898	192796,828	22,6
208	82	Pb	207,976644	193729,017	52,3
209	83	Bi	208,980417	194664,025	100

Синтез

(A1, Z1) + (A2, Z2) --> ■ --> (A3, Z3) + Q

A3 = A1 + A2 Z3 = Z1 + Z2

Деление

(A3, Z3) --> ■ --> (A1, Z1) + (A2, Z2) + Q

A3 = A1 + A2 Z3 = Z1 + Z2

Перегруппировка

(A1, Z1) + (A2, Z2) --> ■ --> (A3, Z3) + (A4, Z4) + Q

A1 + A2 = A3 + A4 , Z1 + Z2 = Z3 + Z4

На основе таблицы стабильных нуклидов компьютер отобрал возможные варианты таких преобразований.

Исходные нуклиды						Продукт синтеза			Выделяемая энергия
Элемент 1	A1	Z1	Элемент 2	A2	Z2	Элемент	A	Z	МэВ
H	1	1	D	2	1	He	3	2	5,4930
H	1	1	Be	9	4	B	10	5	6,5875
H	1	1	B	11	5	C	12	6	15,9565
H	1	1	C	13	6	N	14	7	7,3933
H	1	1	N	15	7	O	16	8	12,1262
H	1	1	O	18	8	F	19	9	7,9922
H	1	1	F	19	9	Ne	20	10	12,8434
H	1	1	Ne	22	10	Na	23	11	8,7905
H	1	1	Na	23	11	Mg	24	12	11,6930
H	1	1	Mg	26	12	Al	27	13	8,2726
H	1	1	Al	27	13	Si	28	14	11,5813
H	1	1	Si	30	14	P	31	15	7,2871
H	1	1	P	31	15	S	32	16	8,8622
H	1	1	S	34	16	Cl	35	17	6,3668
H	1	1	Cl	35	17	Ar	36	18	8,5064
H	1	1	Cl	37	17	Ar	38	18	10,2427
Ar	38	18	Ca	48	20	Sr	86	38	5,4287
Ar	40	18	Ar	40	18	Kr	80	36	7,8106
Ar	40	18	Ca	44	20	Sr	84	38	4,1899
Ar	40	18	Ca	46	20	Sr	86	38	6,3463
Ar	40	18	Ca	48	20	Sr	88	38	8,5111
Ar	40	18	Ti	50	22	Zr	90	40	2,6585
K	41	19	Ca	48	20	Y	89	39	8,1673
Ca	42	20	Ca	48	20	Zr	90	40	6,2140
Ca	43	20	Ca	48	20	Zr	91	40	5,4893
Ca	43	20	Ti	49	22	Mo	92	42	0,3325
Ca	44	20	Ca	46	20	Zr	90	40	4,5261
Ca	44	20	Ca	48	20	Zr	92	40	3,0395
Ca	46	20	Ca	46	20	Zr	92	40	2,5970
Ca	46	20	Ti	46	22	Mo	92	42	0,0298
Sc	45	21	Ca	48	20	Nb	93	41	2,1070
Ti	46	22	Ca	48	20	Mo	94	42	0,2385

Синтез

1389 вариантов

Деление

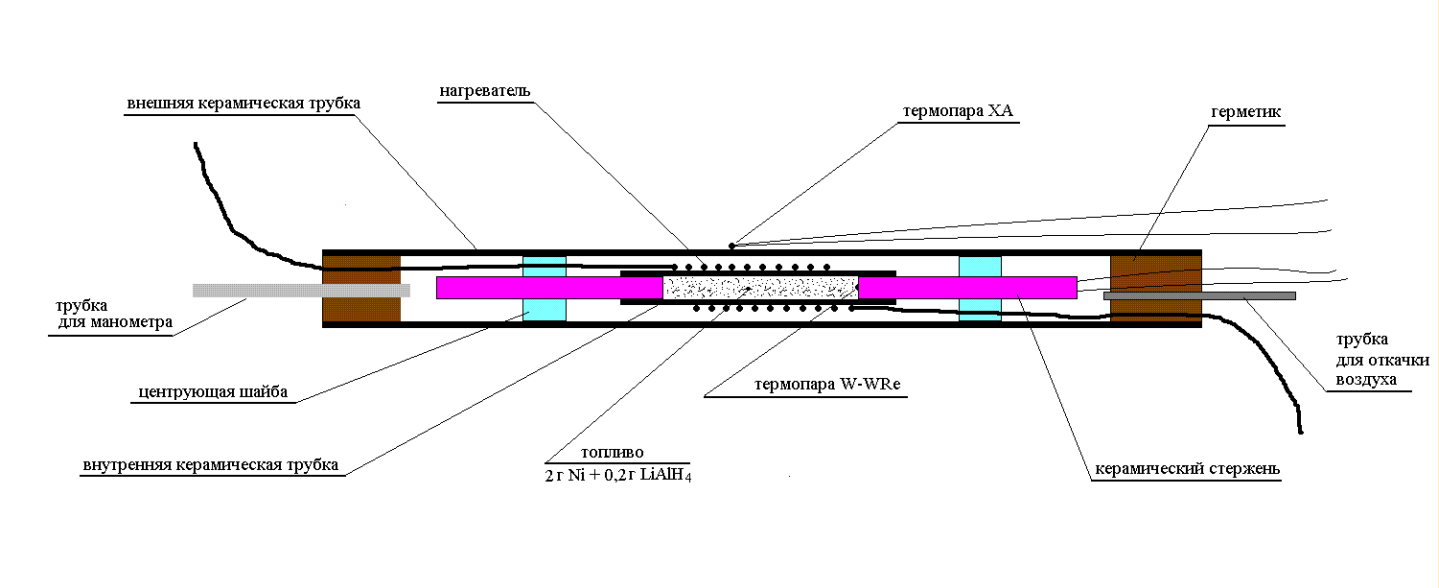
817 вариантов

Исходный нуклид			Продукты деления						Выделяемая
Элемент	A	Z	Элемент 1	A1	Z1	Элемент 2	A2	Z2	энергия
Sr	84	38	Si	30	14	Cr	54	24	0,6856
Sr	84	38	S	34	16	Ti	50	22	0,6716
Zr	94	40	Ca	46	20	Ca	48	20	0,0820
Zr	96	40	Ca	48	20	Ca	48	20	3,2360
Mo	92	42	Si	28	14	Ni	64	28	1,3078
Mo	92	42	Si	30	14	Ni	62	28	3,8974
Mo	92	42	S	34	16	Fe	58	26	4,8000
Mo	92	42	Cl	37	17	Mn	55	25	2,1797
Mo	92	42	Ar	38	18	Cr	54	24	4,3650
Mo	92	42	Ar	40	18	Cr	52	24	3,1596
Mo	92	42	K	41	19	V	51	23	0,4443
Mo	92	42	Ca	42	20	Ti	50	22	2,6753
Mo	92	42	Ca	44	20	Ti	48	22	2,6566
Mo	94	42	Si	30	14	Ni	64	28	2,8131
Mo	94	42	Ar	40	18	Cr	54	24	3,2388
Hg	198	80	Ne	22	10	Yb	176	70	30,4366
Hg	198	80	Ca	48	20	Nd	150	60	87,3061
Hg	199	80	He	4	2	Pt	195	78	0,7759
Hg	199	80	C	13	6	W	186	74	9,8384
Hg	200	80	He	4	2	Pt	196	78	0,7079
Hg	202	80	He	4	2	Pt	198	78	0,4630
Tl	203	81	B	11	5	Os	192	76	1,5053
Pb	204	82	He	4	2	Hg	200	80	1,9766
Pb	204	82	B	11	5	Ir	193	77	0,4508
Pb	204	82	C	12	6	Os	192	76	10,8603
Pb	204	82	O	18	8	W	186	74	18,2284
Pb	206	82	He	4	2	Hg	202	80	1,1299
Pb	208	82	He	4	2	Hg	204	80	0,5207
Bi	209	83	He	4	2	Tl	205	81	3,1224
Bi	209	83	B	11	5	Pt	198	78	3,3366

Перегруппировка 516789 вариантов

Первая пара Исходные нуклиды						Вторая пара Продукты						Выделяемая энергия
Элемент 1	A1	Z1	Элемент 2	A2	Z2	Элемент 3	A3	Z3	Элемент 4	A4	Z4	
D	2	1	He	3	2	H	1	1	He	4	2	18,3542
H	1	1	Li	6	3	He	3	2	He	4	2	4,0222
H	1	1	Li	7	3	He	4	2	He	4	2	17,3481
D	2	1	Li	6	3	H	1	1	Li	7	3	5,0282
D	2	1	Li	6	3	He	4	2	He	4	2	22,3764
H	1	1	Be	9	4	He	4	2	Li	6	3	2,1257
D	2	1	Be	9	4	He	4	2	Li	7	3	7,1539
D	2	1	B	10	5	H	1	1	B	11	5	9,2320
D	2	1	B	11	5	He	4	2	Be	9	4	8,0276
D	2	1	C	12	6	H	1	1	C	13	6	2,7228
D	2	1	C	13	6	He	4	2	B	11	5	5,1679
H	1	1	N	15	7	He	4	2	C	12	6	4,9649
Tl	203	81	Tl	205	81	Hg	202	80	Pb	206	82	1,5994
Tl	203	81	Tl	205	81	Hg	204	80	Pb	204	82	0,2254
Tl	205	81	Tl	205	81	Hg	202	80	Pb	208	82	1,5370
Tl	205	81	Tl	205	81	Hg	204	80	Pb	206	82	0,9278
Tl	203	81	Pb	208	82	Tl	205	81	Pb	206	82	0,0624
Tl	203	81	Bi	209	83	Pb	204	82	Pb	208	82	2,8271
Tl	203	81	Bi	209	83	Pb	206	82	Pb	206	82	3,5918
Tl	205	81	Bi	209	83	Pb	206	82	Pb	208	82	3,5294
Tl	205	81	Bi	209	83	Pb	207	82	Pb	207	82	2,8718
Pb	204	82	Tl	205	81	Tl	203	81	Pb	206	82	0,7023
Pb	204	82	Pb	208	82	Pb	206	82	Pb	206	82	0,7648
Pb	207	82	Pb	207	82	Pb	206	82	Pb	208	82	0,6576

Устройство типичного реактора



Топливо: порошок никеля, смешанный с алюмогидридом лития, разлагающимся при нагреве с выделением водорода.

Топливо находится в корундовой трубке (Al_2O_3), обвитой вольфрамовым нагревателем.

Трубка с топливом и нагревателем находится внутри герметичной корундовой трубы, заполненной водородом или аргоном.

Литий и никель

$^{7}Li + ^{1}H \text{--->} 2\ ^{4}He + 17{,}35$ МэВ

$^{58}Ni + ^{4}He + 2e^{-} \text{--->} ^{62}Ni + 2\ \nu_e + 9{,}96$ МэВ

$^{58}Ni + ^{1}H + 2e^{-} \text{--->} ^{59}Co + 2\ \nu_e + 10{,}32$ МэВ

$^{62}Ni + ^{1}H \text{---->} ^{63}Cu + 6{,}125$ МэВ

$^{64}Ni + ^{1}H \text{---->} ^{65}Cu + 7{,}450$ МэВ

$^{62}Ni + ^{7}Li \text{--->} ^{69}Ga + 17{,}39$ МэВ

$^{58}Ni + ^{62}Ni \text{--->} ^{60}Ni + ^{60}Ni + 1{,}957$ МэВ

$^{58}Ni + ^{64}Ni \text{--->} ^{61}Ni + ^{61}Ni + 1{,}1206$ МэВ

$^{61}Ni + ^{61}Ni \text{--->} ^{60}Ni + ^{62}Ni + 2{,}7665$ МэВ

$^{61}Ni + ^{61}Ni \text{--->} ^{56}Fe + ^{66}Zn + 1{,}0414$ МэВ

$^{58}Ni + ^{64}Ni \text{--->} ^{58}Fe + ^{64}Zn + 0{,}8234$ МэВ

$^{58}Ni + ^{64}Ni \text{--->} ^{60}Ni + ^{62}Ni + 3{,}8871$ МэВ

$^{60}Ni + ^{64}Ni \text{--->} ^{62}Ni + ^{62}Ni + 1{,}9114$ МэВ

$^{58}Ni + ^{64}Ni \text{--->} ^{56}Fe + ^{66}Zn + 2{,}1620$ МэВ

$^{58}Ni + ^{64}Ni \text{--->} ^{59}Co + ^{63}Cu + 0{,}4807$ МэВ

В отработавшем топливе, действительно, обнаружены медь, кобальт, железо, цинк, галлий.

Корунд Al_2O_3

$^{27}Al + ^{27}Al$ ---> ^{54}Fe + 21,2426 МэВ

$^{27}Al + ^{27}Al$ ---> $^{50}Cr + ^{4}He$ + 13,4284 МэВ

$^{27}Al + ^{27}Al$ ---> $^{42}Ca + ^{12}C$ + 4,1377 МэВ

$^{27}Al + ^{27}Al$ ---> $^{38}Ar + ^{16}O$ + 5,0580 МэВ

$^{27}Al + ^{27}Al$ ---> $^{34}S + ^{20}Ne$ + 5,0580 МэВ

$^{27}Al + ^{27}Al$ ---> $^{30}Si + ^{24}Mg$ + 3,9719 МэВ

$^{27}Al + ^{27}Al$ ---> $^{29}Si + ^{25}Mg$ + 0,6884 МэВ

$^{27}Al + ^{27}Al$ ---> $^{28}Si + ^{26}Mg$ + 3,3087 МэВ

$^{16}O + ^{16}O$ ---> ^{32}S +16,5390 МэВ

$^{16}O + ^{16}O$ ---> $^{31}P + ^{1}H$ + 7,6734 МэВ

$^{16}O + ^{16}O$ ---> $^{28}Si + ^{4}He$ + 9,5944 МэВ

$^{16}O + ^{27}Al$ ---> $^{42}Ca + ^{1}H$ + 9,3121 МэВ

$^{16}O + ^{27}Al$ ---> $^{39}K + ^{4}He$ + 9,4388 МэВ

$^{16}O + ^{27}Al$ ---> $^{31}P + ^{12}C$ +2,5029 МэВ

В корундовых трубках после пребывания в реакторах, действительно, обнаружены кальций, сера, кремний, магний, хром, железо, фосфор, калий.

Вольфрам

^{182}W ----> ^{18}O + ^{164}Dy + 18,897 МэВ

^{80}W ----> ^{15}N + ^{165}Ho + 15,б367 МэВ

^{180}W ----> ^{13}C + ^{167}Er + 10,7830 МэВ

^{180}W ----> ^{11}B + ^{169}Tm + 3,0972 МэВ

^{183}W ----> ^{4}He+ ^{167}Hf + 1,5528 МэВ

^{180}W + ^{186}W ----> ^{183}W + ^{183}W + 0,6893 МэВ

^{180}W + ^{186}W ----> ^{182}W + ^{184}W + 1,9189 МэВ

^{180}W + ^{184}W ----> ^{182}W + ^{182}W + 1,3320 МэВ

^{180}W + ^{186}W ----> ^{181}Ta + ^{185}Re + 0,2981 МэВ

^{180}W + ^{186}W ----> ^{174}Yb + ^{192}Pt + 0,8104 МэВ

^{180}W + ^{184}W ----> ^{178}Hf + ^{186}Os + 0,1490 МэВ

Всего 116 вариантов

Лантаноиды - 87
Ртуть - 30
Свинец - 22
Платина – 20
Гафний - 15
Осмий – 11
Кальций - 6
Ксенон - 6
Гелий, углерод, кислород – 4
Неон – 3
Бор, Азот, Магний, Кремний, Титан, Талий, Тантал, Рений, Золото - 1

Лантаноиды, ртуть, свинец, гафний, кальций обнаружены в корундовых трубках и веществе, накопившемся в полостях реакторов.

Огромное многообразие нуклидов,

возникающих в результате низкопороговых ядерных

трансмутаций, можно понять и прогнозировать,

не вникая в физический механизм,

как результат возможных энергетически выгодных

перегруппировок нуклонов.