

В. А. Пшеничний¹, О. О. Грицай^{1,*}, В. М. Павлович¹, О. І. Кальченко¹, В. М. Венедиктов¹,
В. П. Шахов¹, О. В. Дубіковський², Т. М. Сабов², О. В. Косуля²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Інститут фізики напівпровідників НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: ogritzay@ukr.net, ogritzay@kinr.kiev.ua

ПЕРШІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЙ НІКЕЛЬ-ЛІТІЙ-ВОДНЕВОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА В КИСВІ

В ІЯД НАН України проведено перші спостереження реакції виділення тепла в нікель-літій-водневій суміші теплогенератора А. Россі. Наявність цієї реакції реєструвалася за допомогою різниці е.р.с. термопар у двох окремих реакторних камерах з «паливом» та без нього, які знаходились у середині нагрівача. «Паливом» був нікелевий порошок з 10 %-го алюмогідрату літію загальною масою 100 мг. При першому запуску реактора з «паливом» реакція виникає при температурі 950 °С та інтенсивно розвивається до 1050 °С. Різниця е.р.с. термопар у двох реакторних камерах не перевищує 20 °С. За 600 год спостереження цієї реакції було встановлено особливості її поведінки: при повторних запусках реакція починається при температурі менше 700 °С; потужність випромінювання гамма-квантів з енергією вище 50 кеВ, що супроводжує цю реакцію, менше 0,012 мкР/год; потік нейтронів в 4л становить 6000 нейтр./год ($\pm 40\%$); відбулась зміна ізотопного складу ⁶Li з 7 % для «палива» до 12 % для «попелу». Для ізотопів нікелю намічається зменшення складу ⁶⁰Ni на 2,5 % та підвищення складу ⁶²Ni на рівні 0,5 %. Така поведінка свідчить про те, що спостерігається низькотемпературна (низькоенергетична) ядерна реакція (LENR).

Ключові слова: нікель-літій-воднева суміш, низькоенергетична ядерна реакція, гамма-кванти, нейтрони, ізотопний склад.

1. Вступ

Спалах цікавості та здивування проявилися до нікель-літій-водневого реактора (теплогенератора А. Россі) [1] унаслідок суттєвого виділення тепла, яке неможливо пояснити хімічними реакціями, та відсутності розуміння процесів, що відбуваються в ньому. Цікавість ще більше підвищилася, коли було визначено зміну ізотопного складу, відсутність радіоактивних відходів та ядерних випромінювань під час експериментів.

У Лугано (2014 р.) [2] було проведено випробування теплогенератора А. Россі, який працював протягом 32 дб (в якості «палива» використовувалася суміш 600 мг нікелю та 10 % алюмогідрату літію). Оцінка виділення додаткового тепла становила приблизно 5,8 ГДж, що перевищувало затрату енергії для підтримки роботи теплогенератора в 2 - 3 рази. Аналіз ізотопного складу проб «палива» та «попелу», наданих А. Россі, указував на суттєву зміну ізотопного складу цих проб. Так, ⁷Li, що становив 92,4 % літію в «паливі», майже зник у «попелі», а ⁶Li став домінувати. Зміни в ізотопному складі торкнулися і нікелю: у «попелі» став домінувати ⁶²Ni, який в природній суміші нікелю становить 3,6 %. Радіаційні прилади та нейтронний детектор, що були встановлені на відстані не ближче 0,5 м, не відзначали зміни радіаційної дози та нейтронного потоку.

Зміни в ізотопному складі вказують на те, що відбулися низькотемпературні ядерні реакції (НТЯР) або «холодний» ядерний синтез. Аналіз можливих ядерних реакцій, які б могли призвести до таких змін в ізотопному складі, указує на те, що має відбуватися вихід радіації при протіканні таких процесів.

На наш погляд, відсутність радіації при випробуваннях теплогенератора А. Россі може бути спричинена труднощами постановки експериментів із реєстрації радіації. По-перше, наявність нагрівача в декілька сот ват, який створює в реакторі теплогенератора температуру 1000 - 1200 °С, не дає змогу розміщувати детектори радіації та нейтронів поблизу самого реактора. По-друге, стінки реактора, нагрівача та його тепловий захист перешкоджають проходженню радіації до місця реєстрації. По-третє, існує статистика, що реакція в теплогенераторі запускається в третині випадків, тому слід відслідковувати момент появи НТЯР. Але зрозуміло, що основною причиною відсутності ядерних випромінювань під час експерименту є особливості механізму протікання реакції.

Мета нашої роботи – довести чи спростували факт наявності НТЯР у реакторі типу теплогенератора А. Россі та, у разі підтвердження НТЯР, визначити ядерні процеси, що протікають у ньому.

© В. А. Пшеничний, О. О. Грицай, В. М. Павлович, О. І. Кальченко, В. М. Венедиктов, В. П. Шахов, О. В. Дубіковський, Т. М. Сабов, О. В. Косуля, 2019

У цій статті представлено перший етап роботи – створити реактор типу теплогенератора А. Россі, спробувати виявити НТЯР та дослідити радіаційні випромінення, що супроводжують протікання реакції Россі (РР).

2. Створення реактора типу теплогенератора А. Россі

Проаналізувавши наявну літературу [1, 2], при розробці реакторів типу теплогенератора А. Россі було враховано такі моменти:

потужність нагрівача не повинна бути завеликою – не більше 500 Вт;

кількість «палива» повинна бути зменшена в 5 - 10 разів порівняно з експериментом у Лугано;

між реактором та реєструючими детекторами на лінії прямого огляду повинна бути мінімальна кількість матеріалів;

для реєстрації моменту запуску РР слід використати порівняння температур у реакторній камері з «паливом» та камері без «палива» в одній збірці.

У процесі роботи було створено декілька реакторних камер (табл. 1). Для реакторної камери було використано нікелеву трубку діаметром 0,5 см із товщиною стінки 0,02 см та довжиною 9 см. Корками для виділення об'єму $\sim 1 \text{ см}^3$ та довжиною 7 см були стрижні діаметром 0,4 см та довжиною 1 см, що обмазувалися герметиком або клеєм на основі $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_3$. Це дало змогу герметизувати камери й забезпечити тривалу роботу при нагріванні до високих температур, що в свою чергу викликає реакції розкладу алюмогідриду літію, чим спричиняється тиск у реакторній камері до декількох десятків атмо-

сфер. Нагрівач мав внутрішній діаметр 2,5 см. Термопари спочатку наклеювалися на зовнішню поверхню нікелевої трубки посередині довжини, а надалі розміщувалися усередині трубки; корок при цьому був із суцільного клею.

Таблиця 1. Склад «палива» реакторних камер із нікелевих трубок довжиною 9 см та діаметром 0,5 см

Назва реактора	Склад «палива»		
	LiAlH_4	Ni	Домішки
P1*	9,0 мг	70 – 105 мг*	
P2	10,0 мг	96 мг	
P3	9,7 мг	123 мг	
P5	9,4 мг	59 мг	«попіл» 100 мг
P6	11,2 мг	71 мг	

* Частину нікелю при заповненні реакторної камери було втрачено.

З накопиченням досвіду вносилися деякі зміни в процедуру проведення експерименту. Так, після досліджень із першими двома реакторними камерами було зроблено висновок, що при нагріванні повинна використовуватися конструкція із двох камер реактора, одна з яких є пустотілою (РР), а друга – з «паливом» (РN), де N – номер реакторної камери. Позитивна різниця $\Delta \text{e.p.c.}$ термопар у цих двох реакторних камерах буде вказувати на появу додаткового теплового джерела в реакторній камері з «паливом». Після дослідів із реакторною камерою Р3 дійшли висновку, що потрібно використовувати ізолятори між камерами РN та РР близько 1 мм, а збірку намагатися розмістити по осі нагрівача.

Деталі компоновки установки при проведенні експериментів наведено на рис. 1.

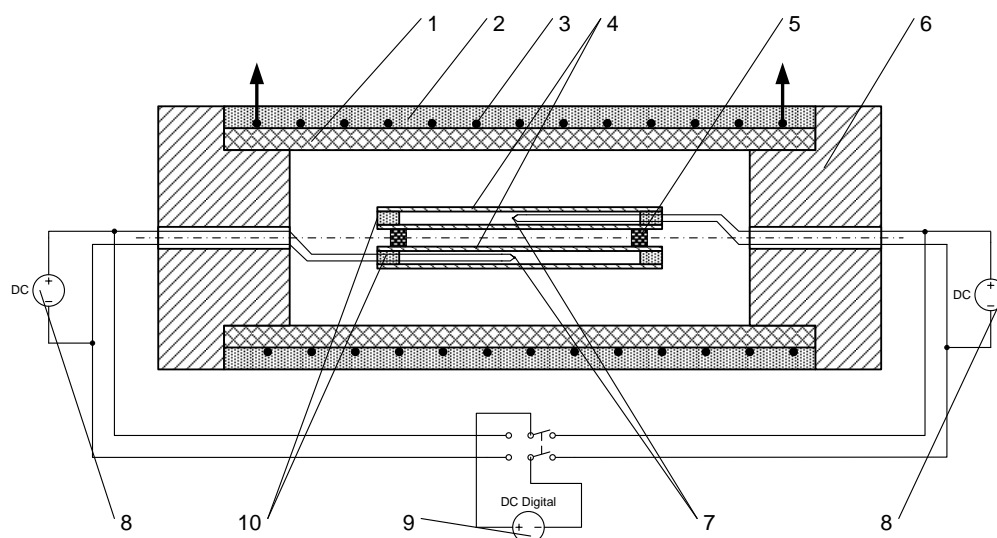


Рис. 1. Установка з двома реакторними камерами: 1 – керамічна трубка; 2 – тепловий захист; 3 – нагрівальна спіраль; 4 – реакторні камери; 5 – керамічний ізолятор; 6 – шамотні корки; 7 – хромель-алюмелеві термопари; 8 – індикаторні мілівольтметри; 9 – цифровий мілівольтметр із перемикачем; 10 – корки реакторних камер.

3. Вимірювання для виявлення РР

На рис. 2 наведено величини Δ в часі для трьох послідовних запусків реакторної камери Р3 із «паливом». Кожна величина Δ відповідає середньому значенню вимірювань за 1 год (3 - 4 вимірювання Δ). На рисунку стрілками з числами наведено часові інтервали між першим - другим та другим - третім запусками, а біля точок вказано температуру термопари в градусах Цельсія пустотілого реактора (РР). У цьому експеримен-

ті реакторні камери були розведені на відстань ~ 8 мм між зовнішніми оболонками, тому можливої суттєвий внесок в Δ постійної складової за рахунок розміщення реакторних камер у нагрівачі. У подальшому використовувалася відстань між оболонками реакторних камер в 1 мм, що могло призвести до збільшення температури РР. Не зважаючи на ці недоліки, можна стверджувати, що в РН відбувається реакція з виділенням тепла при температурі РР ~ 1000 °С. Ця реакція підвищує температуру в РН на ~ 20 °С.

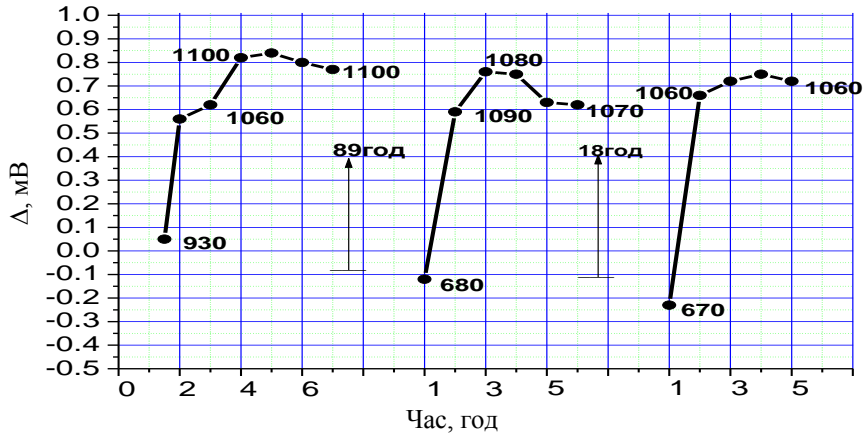


Рис. 2. Величини Δ для перших трьох запусків реактора Р3.

Найбільша величина Δ спостерігається для першого запуску, у наступних запусках вона незначно спадає. Поведінку Δ в цьому експерименті важко пояснити впливом розміщення реакторних камер у нагрівачі. Скоріш за все, це особливості роботи РН. Таким чином, експериментальні вимірювання з реактором Р3 є першими доказами існування РР.

У реакторній камері Р5, в яку додано 100 мг

«попелу», не вдалося спостерігати РР. Створення реакторної камери Р6 було пов'язано з проведенням довготривалих вимірювань Δ та з метою підтвердження ефектів, що спостерігалися у попередніх дослідженнях. На рис. 3 наведено усереднені Δ за 2 - 5 год під час експерименту з моменту виходу на температуру в ~ 1000 °С. Стрілками із цифрами вказано моменти запуску РР, у дужках – тривалість перерви між запусками.

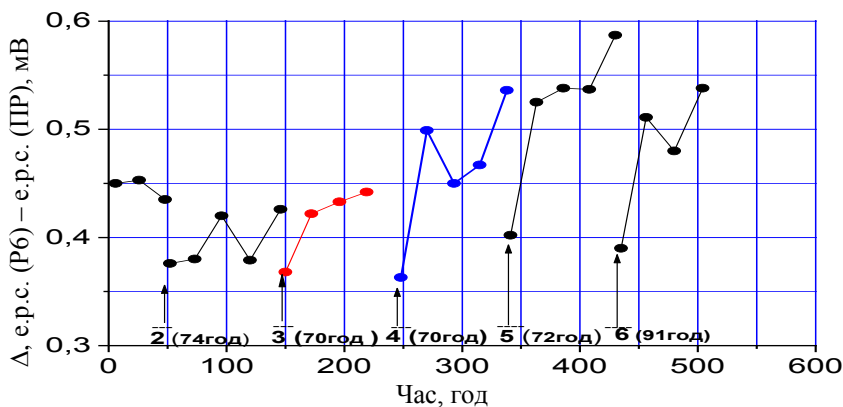


Рис. 3. Усереднені різниці Δ температурних датчиків реакторів Р6 та РР протягом кампанії роботи Р6 за 506 год.

Як видно з рис. 3, підтверджується, що в початкових трьох запусках реактора Р6 перший запуск інтенсивніший за два наступних запуски. Загальна тенденція поведінки Δ , починаючи із 50 год запуску РР, полягає в підвищенні Δ від

0,40 до 0,60 мВ, а потім, починаючи із 450-ї години, зменшується до 0,50 мВ.

На рис. 4 наведено величини Δ при випробуванні реакторної камери Р6 залежно від температури в РР. У вимірюваннях фіксувалися дані Δ

та температура в кінці кожного інтервалу в 30 хв. Залежність 1 – для першого високотемпературного запуску, а 2, 3, 5 – для повторних запусків, що відбувалися після охолодження збірки до кімнатної температури. При температурі 1200 °C на рисунку наведено середнє значення Δ протягом наступних декількох годин. Залежність 1 різко відрізняється від усіх інших: Δ починається від від'ємних значень на рівні $-0,15$ та $-0,10$ мВ і досить різко змінюється в бік збільшення при ~ 950 °C, що продовжується до 1050 - 1100 °C із

величиною $\Delta = 0,45$ мВ. Таким чином, стрибок у 0,6 мВ відбувається в інтервалі 950 - 1100 °C, що є ознакою появи джерела тепла в реакторі Р6 при температурі ~ 1100 °C. Єдине пояснення такого ефекту – увімкнення РР. При повторних запусках спостерігаються подібні між собою процеси – пологі підняття Δ , починаючи з 300 до 1050 °C. Це означає, що РР у повторних запусках починається при більш низьких температурах. При охолодженні спостерігається подібна картина – пологий спуск Δ , починаючи з ~ 1050 °C.

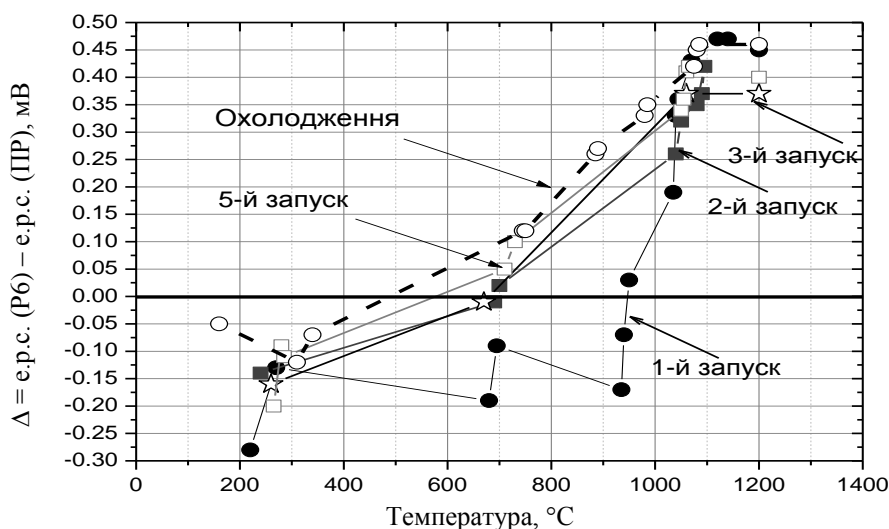


Рис. 4. Різниця Δ температурних датчиків реакторів Р6 та РР від температури РР для 1, 2, 3 та 5-го запусків реактора Р6 та при падінні температури під час охолодження.

4. Пошуки радіаційного та нейтронного випромінень при протіканні РР

Після надійного визначення запуску РР було встановлено обладнання для визначення радіаційного та нейтронного полів, що можуть супроводжувати РР.

Для реєстрації гамма-радіації з енергією більше 50 кеВ було застосовано NaI(Tl) діаметром $5,1 \times 5,1$ см у детекторі SPA-3 (USA) із дозиметричним приладом ESP-2 (USA). Центр такого детектора, протестованого на радієвому джерелі, розмістили на відстані 10 см від центра нагрівача в 5-см свинцевому захисті із чотирьох сторін, із відкритою стороною в напрямку нагрівача. На цьому напрямку розміщувався тепловий екран із дюралюмінію товщиною 4 мм. Природний фон для такої установки детектора становив $3,140 \pm 0,006$ мкР/год (22 вимірювання). При роботі реактора Р6 (1140 °C) потужність дози практично не змінилася – $3,140 \pm 0,006$ мкР/год (5 вимірювань). Похибку оцінено з відхилення від середнього значення. Таким чином, якщо РР супроводжується випроміненням гамма-квантів з енергіями вище 50 кеВ, то його потужність є меншою 0,012 мкР/год.

Для реєстрації нейтронів було використано нейтронний радіометр на основі ESP-2 (USA) з детектором НД-10, розробленим одним з авторів. Детектор НД-10 мав вигляд циліндра діаметром 16 і довжиною 53 см, заповненого парафіном об'ємом близько 10 дм³, по центральній осі якого розміщувався ³He-лічильник СНМ-37, приєднаний до дозиметричного приладу ESP-2. Спеціальними дослідженнями було визначено ефективність реєстрації нейтронів детектором для нейтронів спонтанного поділу ²³⁸U – $(2,3 \pm 0,4)$ %. Детектор розміщувався на відстані 21 см від реакторної збірки. Між детектором та нагрівачем було встановлено тепловий екран із дюралюмінію товщиною 4 мм. Оскільки, як було визначено в експерименті, значення фону варіюється в часі, порівняння відгуків нейтронного детектора проводилося для вимірювань фону, виконаних безпосередньо перед запуском РР, та вимірювань після запуску РР. Індикатором запуску РР був стрибок Δ . Для прикладу на рис. 5 наведено результати одного з циклів вимірювань нейтронних виходів при дослідженні з реакторною камерою Р3 (5 вимірювань по 30 хв перед запуском РР, 4 вимірювання по 30 хв після запуску РР). Горизонтальними лініями показано середні значення

виходів, різниця відгуків – $\delta = 10 \pm 5$ відл./30 хв.

Було проведено 7 подібних циклів і отримано такі δ : 5, 2, 1, 9, 5, 10 і 2. Похибка кожного вимірювання близько 5 відліків. Середня величина $\delta = 5 \pm 2$ відл./30 хв. Оскільки оцінка відносного тілесного кута нейтронного детектора НД-10 для

точкового джерела на відстані 21 см становить 0,09, то можна припустити, що завдяки протіканню РР за 1 год в реакторній камері РЗ випромінюється 6000 нейтронів ($\pm 40\%$) або 1 - 2 нейтрона за секунду.

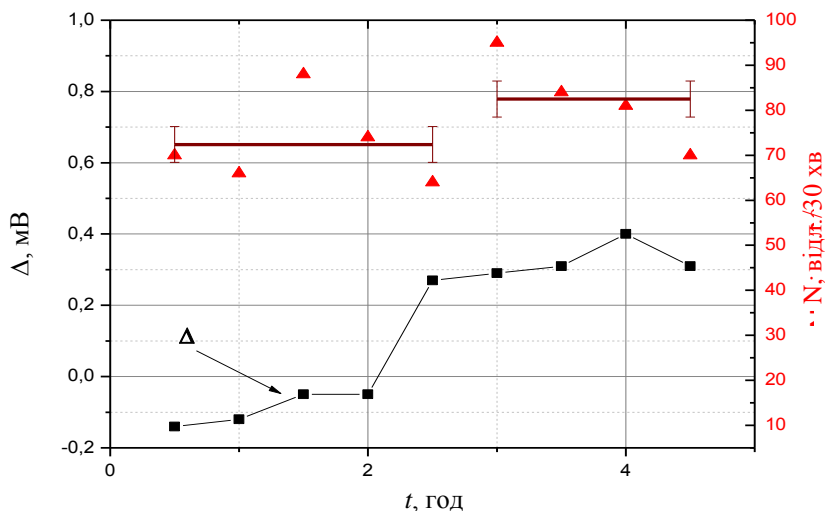


Рис. 5. Вимірювання з нейтронним детектором на реакторній камері РЗ.

5. Ізотопні склади елементів літію та нікелю в «паливі» та «попелі» реактора

Для визначення ізотопного складу проб «палива» та «попелу» реактора Р6, що пропрацював близько 600 год, ми використовували квадрупольний мас-спектрометр вторинних іонів Atomica 4000, PerkinElmer (SIMS) із кисневим джерелом O_2^+ та квадруполем, в якому іон з конкретним A/Z попадає в резонанс з високочастотним полем і проходить у детектор. Це одноканальний спектрометр, який реєструє інтенсивність резонансних іонів. Ширина каналу мас-спектрометра близько 0,1 а.о.м. Було виміряно 4 масових спектри: 2 спектри для «палива» та 2 спектри для «попелу».

Для визначення інтенсивності атомів літію $\overline{I_{Li_j}}$ масою $A + \delta$, де δ – дефект маси, який згідно з [3] для ізотопів літію приблизно дорівнює $+0,02$ а.о.м., використовувалися три значення інтенсивності I_{Li_j} в масовому спектрі: перше – значення в каналі, що є найближчим до $A + \delta$, друге (та третє) визначалися, використовуючи лінійну інтерполяцію між значеннями в каналі ліворуч (та праворуч) та значенням у каналі, що є найближчим до $A + \delta$. Інтенсивність атомів літію з масою $A + \delta$ визначалася як середнє арифметичне цих трьох величин, розкид значень від середнього давав оцінку похибки.

Інтенсивності атомів нікелю $\overline{I_{Ni_j}}$ з масою $A + \delta$ (згідно з [3] $\delta \approx -0,07$ а.о.м.) також розраховувалися як середнє арифметичне трьох вели-

чин, але ці величини отримувалися трохи по-іншому. Кожна з величин визначалася для положення $A + \delta$, припускаючи, що інтенсивність I_{Ni_j} у проміжних точках між каналами підлягає лінійно лінійному закону інтерполяції. Для першої величини використовувалися інтенсивності в каналах i та $i + 1$ – найближчі канали ліворуч та праворуч від $A + \delta$, друга величина визначалася при використанні інтенсивності в каналах $i - 1$ та i , третя величина – у каналах $i + 1$ та $i + 2$.

Концентрації ізотопів n_{Li_j} та n_{Ni_j} визначалися як

$$n_{Li_j} = I_{Li_j} / \sum_{i=1}^2 I_{Li_{j_i}},$$

$$n_{Ni_j} = I_{Ni_j} / \sum_{i=1}^5 I_{Ni_{j_i}}. \quad (1)$$

Концентрації $\overline{n_{Li_j}}$ та $\overline{n_{Ni_j}}$, наведені в табл. 2 для спектрів «палива» і «попелу», визначалися як середнє арифметичне 6 величин: по 3 значення n_{Li_j} (чи n_{Ni_j}) для кожного з двох вимірних мас-спектрів. Похибки концентрації ізотопів обчислювалися як

$$\overline{\Delta n_{Li_j}} = \sqrt{\frac{(\overline{n_{Li_j}} - n_{Li_j})^2}{k(k-1)}}, \quad \overline{\Delta n_{Ni_j}} = \sqrt{\frac{(\overline{n_{Ni_j}} - n_{Ni_j})^2}{k(k-1)}}, \quad (2)$$

де $k = 6$.

Таблиця 2. Середні ізотопні склади літію та нікелю в «паливі» (2 спектри SIMS) та «попелі» (2 спектри SIMS) після 600 год роботи реактора Р6, %

Ізотоп	Природний склад [3]	«Паливо»	«Попіл»	Різниця «попіл» - «паливо»
⁶ Li	7,59 (4)	7,00 ± 0,96	12,05 ± 0,24	5,05 ± 1,00
⁷ Li	92,41 (4)	93,17 ± 1,04	87,95 ± 0,24	-5,22 ± 1,10
⁵⁸ Ni	68,077 (9)	69,70 ± 1,22	71,43 ± 1,06	1,73 ± 1,66
⁶⁰ Ni	26,223 (8)	25,46 ± 1,34	23,11 ± 0,99	-2,35 ± 1,67
⁶¹ Ni	1,1399 (13)	1,03 ± 0,13	1,02 ± 0,07	-0,01 ± 0,15
⁶² Ni	3,6346 (40)	3,18 ± 0,22	3,61 ± 0,08	0,43 ± 0,23
⁶⁴ Ni	0,9255 (19)	0,64 ± 0,08	0,83 ± 0,08	0,19 ± 0,11

Таблиця 3. Інтенсивності ізотопів нікелю та атомів в області з А = 58 ÷ 66 у спектрах SIMS, відл./с

А, а.о.м.	«Паливо»		«Попіл»		Різниця «попіл»- «паливо»
	Інтенсивність Ni	Інтенсивність	Інтенсивність Ni	Інтенсивність	
58	321450 ± 3920	—	329430 ± 3490	—	8000 ± 5200
59	—	530 ± 23	—	290 ± 17	-240 ± 29
60	117420 ± 1570	—	106530 ± 1070	—	-11000 ± 1900
61	4750 ± 10	—	4700 ± 30	—	-50 ± 35
	—	4190 ± 65	—	4570 ± 68	380 ± 94
62	14670 ± 30	—	16630 ± 10	—	2000 ± 35
63	—	0	—	230 ± 15	230 ± 15
64	2950 ± 10	—	3880 ± 30	—	930 ± 35
65	—	0	—	1440 ± 38	1440 ± 38
66	—	0	—	420 ± 20	420 ± 20

У табл. 2 наведено дані концентрацій для ізотопів літію та нікелю. У третій колонці наведено концентрації ізотопів нікелю для «палива», які можна порівняти з природним ізотопним складом (друга колонка). Визначені похибки вимірювань дають підставу вважати, що отримані дані узгоджуються з природним складом у межах двох похибок.

За 600 год роботи реактора Р6 концентрація ⁶Li змінилася із 7 до 12 %, концентрація ⁷Li – із 93 до 88 %, концентрація ⁵⁸Ni підвищилася, а ⁶⁰Ni знизилася в межах 2 %. Концентрації ізотопів ⁶¹Ni, ⁶²Ni та ⁶⁴Ni майже не змінилися або змінилися дуже мало.

У табл. 3 в третій і п'ятій колонках наведено інтенсивності зі спектрів мас для атомів із непарними А: 59, 61, 63, 65 та парним 66. У другій і четвертій колонках таблиці наведено інтенсивності для ізотопів нікелю, перераховані за даними концентрацій, наведених у табл. 2. Для «палива» перерахунок проводився за формулою

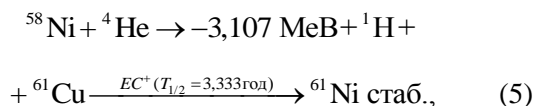
$$I_{Ni_j}^{пал.} = n_{Ni_j}^{пал.} \cdot \sum_{i=1}^5 I_{Ni_{ji}}^{пал.}, \quad (3)$$

тобто фактично для «палива» наведено інтенсивності зі спектрів мас. Для «попелу» інтенсивності перенормовувалися як

$$I_{Ni_j}^{попіл} = n_{Ni_j}^{попіл} \cdot \sum_{i=1}^5 I_{Ni_{ji}}^{попіл}. \quad (4)$$

Як видно з табл. 3, для ⁵⁸Ni підвищення інтенсивності є в межах похибок, а для ⁶⁰Ni спостерігається надійне зменшення інтенсивності. У той же час інтенсивності ⁶²Ni та ⁶⁴Ni підвищуються. Концентрація ⁶¹Ni, перерахована із значень інтенсивностей, не змінилася, а самі інтенсивності масових спектрів дещо підвищилися (третя, п'ята і шоста колонки). Атоми із А = 59 присутні в «паливі» – це ⁵⁹Co. У «попелі» кількість цих атомів помітно зменшилася. У «паливі» атоми із А = 63 та 65 відсутні. У «попелі» вони присутні, це можуть бути ізотопи міді із високотемпературного герметика, яким запаковувалися корки реакторних камер. Але природне співвідношення ізотопів ⁶³Cu/⁶⁵Cu ≈ 2. Згідно з таблицею кількість атомів із А = 65 приблизно в 7 разів більша, ніж атомів з А = 63. Можемо припустити, що ці атоми створені в результаті протікання РР. Звернемо увагу на інтенсивності атомів з непарними А: 59, 61, 63, 65. У результаті РР кількість атомів з А = 59 не змінилася або навіть зменшилася. Це означає, що реакція з проникненням низькоенергетичного протону в ядро ⁵⁸Ni відсутня. Подібна ситуація з ⁶¹Ni: реакція захоплення низькотемпературного протона ядром ⁶⁰Ni або відсутня, або має дуже малий переріз. Інтенсивності для А = 63, 65 незначні, і ці атоми не можуть створюватися реакцією p + ^ANi, бо кількість відповідних ізотопів ^ANi в десятки разів менша, ніж ізотопів ⁵⁸Ni та ⁶⁰Ni, де ця реакція не підтверджується. Спостерігається найбільший вихід новостворених атомів з А = 65, а атомів з А = 66 приблизно втричі менше. Появу атомів з непарними

А можна пояснити реакціями альфа-частинок із парними ізотопами нікелю – 58, 60, 62 та вильотом протона і залишкового ядра:

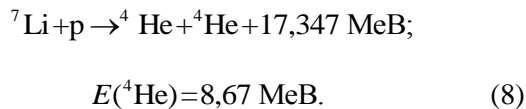


При протіканні цих реакцій залишки енергії майже повністю передаються протону без випромінювання високоенергетичних гамма-квантів. Останнє ми підкреслюємо, бо високоенергетичні гамма-кванти не спостерігалися при роботі реактора Р6.

На жаль, використання квадрупольного мас-спектрометра вторинних іонів не дозволяє зробити однозначних висновків щодо незначних змін ізотопного складу для $A = 58 \div 66$, можливо говорити лише про тенденцію. Для якісного аналізу потрібно використовувати магнітний мас-спектрометр або мати значно більші зміни концентрацій цих ізотопів.

З даних, отриманих за допомогою квадрупольного мас-спектрометра вторинних іонів, можемо більш впевнено сказати про зміни концен-

трації ^6Li та ^7Li , які сягають 5 %. За фактом, що ^7Li «вигорає», ми вважаємо за джерело альфа-частинок реакцію проникнення низькоенергетичного протона в ядро ^7Li (як і в [4]):



Пробіг альфа-частинок з енергією 8,67 MeV у нікелі 18 мкм, тому досить вірогідне проникнення їх в ядро.

Експериментальної інформації з перерізів взаємодії альфа-частинок з ядрами ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{62}Ni дуже мало, але ці дані є в розрахунковій бібліотеці TENDL-2017. На рис. 6 наведено дані з TENDL-2017 та експериментальні значення перерізів взаємодії альфа-частинок з ядрами ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{62}Ni , що наявні в EXFOR. Як видно з рисунка, розрахункові перерізи з TENDL-2017 дуже добре узгоджуються з наявними експериментальними даними, тому для оцінки перерізів (α, p) , (α, n) та (α, γ) при енергії альфа-частинок $E_\alpha = 8,67 \text{ MeV}$ з ядрами ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{62}Ni ми скористалися даними з TENDL-2017 (табл. 4). Інші реакції альфа-частинок з ізотопами нікелю мають значно вищі пороги.

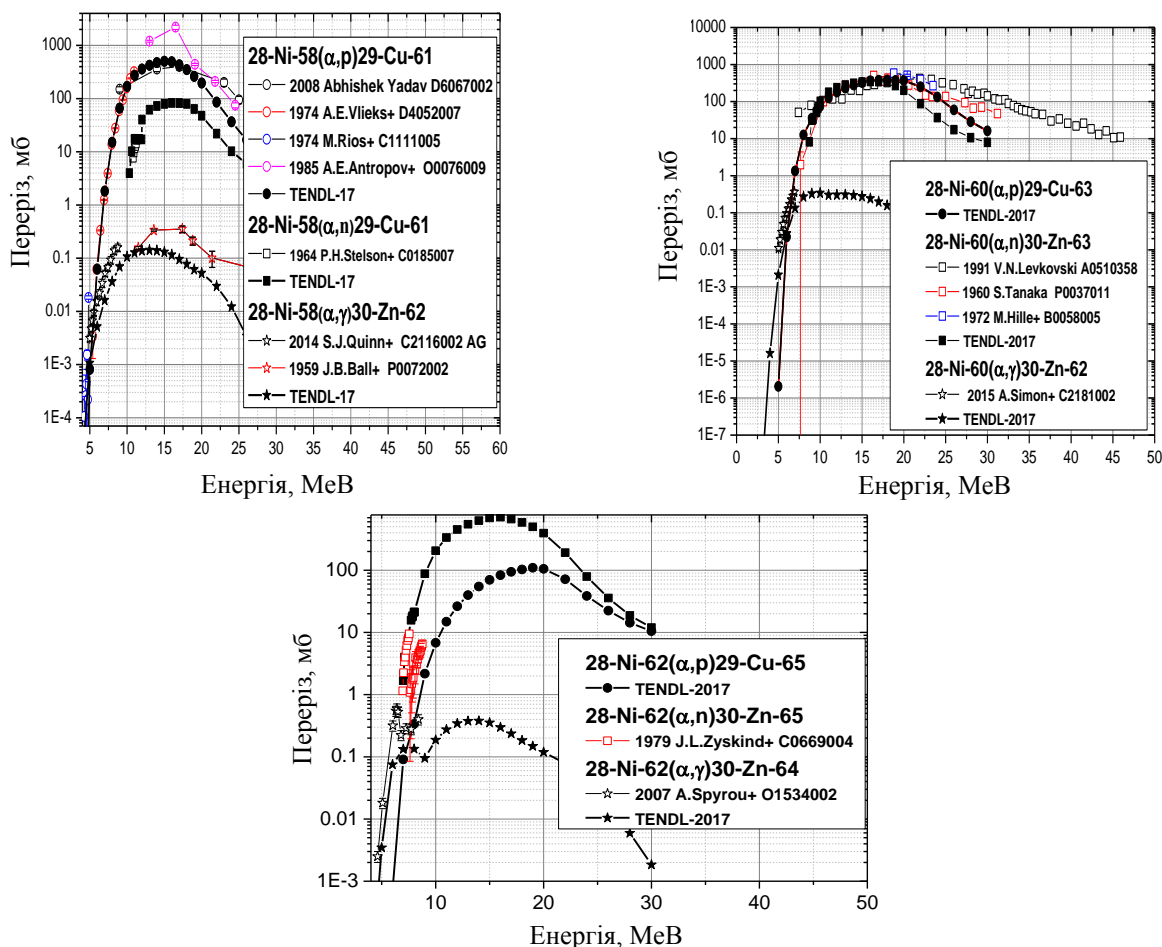


Рис. 6. Перерізи реакцій (α, p) , (α, n) , (α, γ) для ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{62}Ni з EXFOR та TENDL-2017.

Таблиця 4. Перерізи реакцій (α, p), (α, n), (α, γ) для ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{62}Ni для $E_\alpha = 8,67 \text{ MeV}$

Ізотоп	Переріз реакції (α, p), мб	Переріз реакції (α, n), мб	Переріз реакції (α, γ), мб
^{58}Ni	49,14	0 (поріг 10,3 MeV)	$58,57 \cdot 10^{-3}$
^{60}Ni	27,98	4,23	$30,84 \cdot 10^{-2}$
^{62}Ni	1,57	65,12	$1,08 \cdot 10^{-1}$

Як видно з табл. 4 перерізи реакції (α, p) набагато вищі перерізів реакції (α, γ) для всіх трьох ізотопів нікелю, що і проявляється у відсутності гамма-квантів при протіканні РР. Переріз реакції (α, n) для ^{60}Ni приблизно в 6 разів нижчий, а для ^{62}Ni приблизно в 40 разів вищий, ніж перерізи реакції (α, p), тому виявлена в експерименті наявність нейтронів може бути спричинена цими реакціями.

6. Оцінка виділеної енергії в РР

Реактор Р6 працював протягом 600 год. Середня потужність нагрівача при запуску РР в основному 350 Вт, при цьому спостерігалися температури: Р6 – 1116 °С, а РР – 1100 °С. Різниця в 16 °С відповідає $\Delta = 0,6 \text{ мВ}$, бо е.р.с. хромель-алюмелевої термопары при зазначених температурах має термоелектричний коефіцієнт $0,037 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$. Оскільки термопары повністю ідентичні одна одній, як і самі реакторні камери Р6 та РР, то відношення потужностей випромінювання реакторних камер можна оцінити за абсолютними температурами термопар 1409 та 1393 К. Згідно із законом Стефана - Больцмана відношення потужностей випромінювання в реакторних камерах Р6 та РР становить: $W(\text{Р6})/W(\text{РР}) = (1409/1393)^4 = 1,0467$. Тобто додаткова інтенсивність випромінювання в реакторі Р6 збільшилася на $\sim 4,7 \%$.

Ми здійснили спеціальний дослід, щоб визначити, яка має бути додаткова потужність нагрівача для того, щоб е.р.с. термопары в РР підвищилася на 0,6 мВ. Для потужності нагрівача 350 Вт середнє значення такої додаткової потужності виявилось 9,3 Вт. Але не слід забувати, що це є потужність нагрівача, що йде на нагрівання реакторної камери разом із втратами на випромінювання та підтримку стаціонарного режиму. Припускаємо для спрощення, що 1/3 додаткової потужності йде лише на нагрівання реакторної камери РР. Тобто 3,1 Вт забезпечує нагрівання РР на $\Delta = 0,6 \text{ мВ}$, або йде на збільшення потужності на 0,9 % від 350 Вт загальної потужності нагрівача. Нагрівання камери Р6 при наявності РР збільшується на 4,7 % від нагрівання РР, і тоді можна зробити приблизну оцінку енергії, що випромінює реакторна камера Р6 за годину – 60 кДж/год.

Вище відзначалося, що ізотопний склад літію змінився. У першому наблизенні можна вважати, що кількість ^7Li зменшилася на 5,22 %, що відповідає виділенню (за допомогою реакції (8) за ~ 600 год роботи реактора Р6) енергії $211,5 \cdot 10^5 \text{ Дж}$ або потужності 35 кДж/год. Це приблизно поло-

вина від оцінки потужності випромінювання Р6. До речі, в Лугано за рахунок вигорання ^7Li також виділялося близько половини від повної енергії, що певною мірою підтверджує правильність нашої оцінки виділення енергії Р6. Слід зазначити, що під час експерименту в Лугано виділялася додаткова потужність 7,55 МДж/год, що в 126 разів більше, ніж 60 кДж/год. Враховуючи «паливну» загрузку реакторів у Лугано (600 мг) та Р6, можна було б очікувати потужність для реактора Р6 усього у 20 разів меншу. Тому, якщо ми спостерігаємо ту ж реакцію, що й у Лугано, можна зробити висновок, що РР має складну залежність потужності від кількості та складу «палива». Подібне явище відзначає і В. Ф. Зеленський у роботі [4].

7. Висновки

Варіації величини Δ є надійною вказівкою інтенсивності або швидкості РР. При першому запуску реактора з «паливом» РР починається при ~ 950 °С та інтенсивно розвивається до 1050 °С. Подальше підвищення температури до 1250 °С суттєво не збільшує швидкість РР. Після припинення нагрівання реакторної камери та достатньо довготривалої витримки при кімнатній температурі, при наступному нагріванні камери РР запускається знову. Максимальна інтенсивність РР менша, ніж при першому запуску. Така особливість підтверджується для всіх повторних запусків РР, при чому її інтенсивність протягом декількох годин схильна до деяких коливань у межах $\sim 10 \%$ через причини, природу яких визначити не вдалося. При повторних запусках РР починається при температурах, менших 700 °С.

Під час 506-годинного експерименту спостерігалася макроструктура швидкості РР: в інтервалі 0 - 150 год – падіння на $\sim 10 \%$ від інтенсивності при першому запуску, далі до 450 год – підвищення на 40 %, у кінці експерименту – падіння на $\sim 10 \%$.

Якщо РР супроводжується випромінюванням гамма-квантів з енергіями вище 50 кеВ, то його потужність менше 0,012 мкР/год.

Завдяки протіканню РР у реакторній камері Р3 випромінюється 6000 ($\pm 40 \%$) нейтронів за годину.

За 600 год роботи реактора Р6 концентрація ^6Li змінилася із 7 до 12 % (див. табл. 2). Концентрації ізотопів нікелю змінилися також: ^{60}Ni зменшилася на 2,5 %, ^{62}Ni підвищилася на 0,5 %. Така поведінка підтверджує, що спостерігається низькотемпературна ядерна реакція (НТЯР).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. A. Rossi, S. Focardi. Experimental test of a mini-Rossi device at the Leonardo corporation, Bologna, 29 March 2011. *Journal of Nuclear Physics*, 2012.
2. G. Levi et al. Observation of abundant heat production from a reactor device and of isotopic changes in the fuel. *Preprint. AMS Acta* (2014).
3. *Nuclear Wallet Cards 2011, 8th Edition*.
4. В.Ф. Зеленский. Реакции ядерного синтеза в вакууме и в веществе и два пути освоения энергии ядерного синтеза. Препринт ННЦ ХФТИ. ХФТИ-2016-1 (Харьков, 2016) 106 с. / V.F. Zelensky. Nuclear fusion reactions in vacuum and in matter and two ways of nuclear fusion energy exploration. Preprint NSC KIPT. KIPT-2016-1 (Kharkiv, 2016) 106 p. (Rus)

**В. А. Пшеничний¹, О. А. Грицай^{1,*}, В. Н. Павлович¹, А. И. Кальченко¹, В. М. Венедиктов¹,
В. П. Шахов¹, А. В. Дубиковский², Т. М. Сабов², А. В. Косуля²**

¹ *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

² *Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, Украина*

*Ответственный автор: ogritzay@ukr.net, ogritzay@kinr.kiev.ua

ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИЙ НИКЕЛЬ-ЛИТИЙ-ВОДОРОДНОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА В КИЕВЕ

В ИЯИ НАН Украины проведены первые наблюдения реакции выделения тепла в никель-литий-водородной смеси теплогенератора А. Росси. Наличие этой реакции регистрировалась с помощью разницы э.д.с. термопар в двух отдельных реакторных камерах с «топливом» и без него, которые находились в середине нагревателя. «Топливом» служил никелиевый порошок с 10 % алюмогидрата лития общей массой 100 мг. При первом запуске реактора с «топливом» реакция возникает при температуре 950 °С и интенсивно развивается до 1050 °С. Разница э.д.с. термопар в двух реакторных камерах не превышает 20 °С. За 600 ч наблюдения этой реакции были установлены особенности ее поведения: при повторных запусках реакция начинается при температуре менее 700 °С; мощность излучения гамма-квантов с энергией выше 50 кэВ, что сопровождает эту реакцию, меньше 0,012 мкР/ч; поток нейтронов в 4π составляет 6000 нейтр./ч (±40 %); произошло изменение изотопного состава ⁶Li с 7 % для «топлива» до 12 % для «пепла». Для изотопов никеля намечается уменьшение состава ⁶⁰Ni на 2,5 % и увеличение состава ⁶²Ni на уровне 0,5 %. Такое поведение безусловно свидетельствует о том, что наблюдается низкотемпературная (низкоэнергетическая) ядерная реакция (LENR).

Ключевые слова: никель-литий-водородная смесь, низкоэнергетическая температурная ядерная реакция, гамма-кванты, нейтроны, изотопный состав.

**V. A. Pshenichnyi¹, O. O. Gritzay^{1,*}, V. M. Pavlovych¹, O. I. Kalchenko¹, V. M. Venedyktov¹,
V. P. Shakhov¹, O. V. Dubikovskiy², T. M. Sabov², O. V. Kosulja²**

¹ *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

² *Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: ogritzay@ukr.net, ogritzay@kinr.kiev.ua

FIRST RESEARCH OF NICKEL-LITHIUM-HYDROGEN TEPLOGENERATOR REACTIONS IN KYIV

The first observations of the heat release reaction in the nickel-lithium-hydrogen mixture of the A. Rossi heat generator were carried out at the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. The presence of this reaction was recorded using the difference of the e.m.f. thermocouples in two separate reactor chambers with “fuel” and without it, which were inside of the heater. “Fuel” was a nickel powder with 10 % lithium aluminum hydride, total weight of 100 mg. At the first start-up of reactor with “fuel”, the reaction occurs at the temperature of 950 °C and intensively develops up to 1050 °C. Difference e.m.f. thermocouples in two reactor chambers does not exceed 20 °C. For 600 h of observation of this reaction, its behavior was ascertained: under repeated starts, the reaction begins at the temperature of less than 700 °C; the radiation power of gamma quanta with energy above 50 keV, which accompanies this reaction, is less than 0.012 μR/h; the neutron flux in 4π composes 6000 neutrons/h (±40 %); there was change in the isotope composition of ⁶Li from 7 % for “fuel” to 12 % for “ash”. For nickel isotopes, the decrease in the composition of ⁶⁰Ni by 2.5 % and the increase in the composition of ⁶²Ni at 0.5 % is indicated. This behavior certainly indicates that a low-energy nuclear reaction (LENR) is observed.

Keywords: nickel-lithium-hydrogen mixture, low-energy nuclear reaction, gamma quanta, neutrons, isotope composition.

Надійшла 25.06.2018

Received 25.06.2018