

PACS numbers: 07.89.+b, 28.41.-i, 29.20.Ej, 29.25.Dz, 81.05.Bx, 81.40.Np

Використання алюмінійового стопу у новітніх ядерних установках

Є. І. Білодід, О. В. Кухоцький

*Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки,
вул. Василя Стуса, 35–37,
03142 Київ, Україна*

Розвиток енергетики, зокрема ядерної, супроводжується винаходами нових матеріалів, нових процесів оброблення матеріалів. Але інколи складається так, що матеріали, стопи, які добре себе зарекомендували майже століття тому, знаходять «друге дихання» у сучасних проектах та новітніх ядерних установках. Стаття присвячена добре відомому і широко поширеному у дослідницьких ядерних установках алюмінійовому стопу САВ-1. Після інтенсивного будівництва дослідницьких установок у СРСР в 50–70^х роках минулого століття, використання стопу САВ-1 було обмежено виробництвом елементів тепловидатних збірок (ТВЗ) для дослідницьких реакторів країн, що були у складі СРСР та Східного блоку. Проте, на початку 2000^х у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ ХФТІ) НАН України виникла ідея використання наявного прискорювача електронів у новітній ядерній дослідницькій установці — підкритичній збірці, яка керується лінійним прискорювачем електронів. Алюмінійовий стоп САВ-1 є основним конструкційним матеріалом елементів активної зони ядерної підкритичної установки (ЯПУ). З нього зроблені, зокрема, корпус та днище баку, опорна плита, корпус нейтронно-утворювальної мішені (НУМ), елементи перевантажувальної машини, головки і хвостовики елементів активної зони, а також облицювання басейнів зберігання відпрацьованих ТВЗ та відпрацьованих мішеней. Активна зона ЯПУ «Джерело нейтронів» набирається з ТВЗ ти-

Corresponding author: Yevhen Ihorovych Bilodid
E-mail: ei_beloded@sstc.ua

*State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety
35–37 Vasyly' Stus Str., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: Ye. I. Bilodid and O. V. Kukhotskyi, Use of Aluminium Alloy in State-of-the-Art Nuclear Installations, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 5: 623–638 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.05.0623](https://doi.org/10.15407/mfint.44.05.0623)

пу ВВР-М2, основним конструкційним матеріалом якої є алюмінієвий стоп. Експлуатаційні параметри установки добре підходять для використання у якості конструкційного матеріалу стопу САВ-1. Температура експлуатації елементів ЯПУ зі стопу САВ-1 є досить низькою, що забезпечує відсутність їх окрихчення під час експлуатації. Високі ресурсні характеристики САВ-1 під дією опромінення, характерного для ядерних дослідницьких установок, підтверджені багаторічним практичним досвідом використання на реакторах ВВР-М.

Ключові слова: САВ-1, ЯПУ, ADS, алюмінієвий стоп, джерело нейтронів, ХФТІ.

The invention of new materials and new material treatment processes is accompanied with the development of energy sectors, in particular, nuclear energy. However, sometimes materials and alloys that are proven to work well almost a century ago find a 'second breath' in latter-day projects and state-of-the-art nuclear installations. The article is dedicated to the well-known CAB-1 aluminium alloy that is widely used in nuclear research facilities. After the intensive construction of research facilities in the USSR in the 1950^s–1970^s, the use of the CAB-1 alloy was limited to the fabrication of fuel elements for research reactors of the former USSR and Eastern Bloc countries. Nevertheless, in the early 2000^s, the Kharkiv Institute of Physics and Technology (KIPT) came up with the idea of using the existing electron accelerator in a state-of-the-art nuclear research facility such as a subcritical assembly driven by a linear electron accelerator. The CAB-1 aluminium alloy is the main structural material of core elements in the nuclear subcritical facility (NSF). In particular, the tank casing and bottom, support plate, casing of the neutron-generating target, parts of the reloading machine, top and end pieces of the core elements, and lining of the cooling pools for spent fuel assemblies and targets are made of the aluminium alloy. The NSF core is composed of ВВР-М2 fuel assemblies, also made of the aluminium alloy as the main structural material. The NSF operational parameters fit well to the use of the CAB-1 alloy as a structural material. The operating temperature of the NSF components made of CAB-1 alloy is quite low and thus prevents their embrittlement in operation. The high lifetime characteristics of CAB-1 in operation under irradiation, typical of nuclear research facilities, are confirmed by many years of experience in the use in ВВР-М reactors.

Key words: CAB-1, NSF, ADS, aluminium alloy, neutron source, KIPT.

(Отримано 7 жовтня 2021 р.; остаточн. варіант — 19 січня 2022 р.)

1. ВСТУП. ПЕРЕДУМОВИ ПРОЄКТУ ЯПУ «ДЖЕРЕЛО НЕЙТРОНІВ»

У відповідності з домовленостями Вашингтонського саміту, викладеними у спільній заяві Президентів України та США у квітні 2010 р. та Меморандумом [1] про взаєморозуміння між Урядом України та Урядом Сполучених Штатів Америки стосовно співробіт-

ництва з питань ядерної безпеки, підписаного 26 вересня 2011 р., на базі Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ ХФТІ) НАН України створюється ядерна підкритична установка «Джерело нейтронів, засноване на підкритичній збірці, що керується лінійним прискорювачем електронів» (далі — ЯПУ «Джерело нейтронів»). Фінансування створення цього об'єкту забезпечує Уряд Сполучених Штатів Америки відповідно до положень Меморандуму [1] як компенсацію за вивезення з України високозбагаченого ядерного палива. У липні 2020 р. розпочато фізичний пуск, тобто, стадію введення ЯПУ в експлуатацію, яка включає завантаження ядерного палива до проектної кількості тепловидатних збірок (ТВЗ) у активній зоні та досягнення встановленого в проекті значення коефіцієнта розмноження нейтронів (k_{eff}) [2].

Ядерна підкритична установка «Джерело нейтронів» за міжнародною класифікацією ядерних установок є ядерною системою, що керується прискорювачем елементарних часток (англ. Accelerator Driven System, ADS). В ADS одержання інтенсивного потоку нейтронів засноване на принципі розмноження первинних фотонейтронів в середовищі з подільного матеріалу. Геометрія середовища і маса подільного матеріалу обрані таким чином, щоб ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів k_{eff} для будь-яких початкових подій залишався менше 0,98. Ядерна підкритична установка «Джерело нейтронів» призначена для дослідження підкритичних систем, генерації нейтронів і використання їх в прикладних і фундаментальних наукових дослідженнях, а також для підготовки фахівців у галузі використання ядерної енергії.

Ядерна підкритична установка «Джерело нейтронів» є унікальною інноваційною установкою, яка за технічними характеристиками станом на 2021 р. не має аналогів у світі. Для реалізації проекту ЯПУ «Джерело нейтронів» задіяні організації з декількох країн, серед яких США, Китай, Російська федерація та Україна. Проектування, будівництво і подальша експлуатація такого сучасного об'єкту для ядерних досліджень, що кардинально відрізняється від існуючих на сьогодні в Україні, стало справжнім викликом у першу чергу для експлуатувальної організації (ННЦ ХФТІ), регульованого органу (Державної інспекції ядерного регулювання України) та організації науково-технічної підтримки (Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки, ДНТЦ ЯРБ), а також низки підрядних організацій. Зокрема, ННЦ ХФТІ зіткнулися з технічними викликами пов'язаними з інноваційністю установки, необхідністю застосування нових паливних та конструкційних матеріалів, що забезпечать безпечну експлуатацію установки у всіх режимах. Виклики регулюючого органу були пов'язані насамперед з відсутністю нормативної бази для такого типу установок, а

також досвіду їх ліцензування. Крім декількох документів СРСР, розроблених у 1975 [3] та 1988 [4] рр., в Україні були відсутні нормативні документи для підкритичних стендів та установок на їх основі, тим більше, для таких, які керуються прискорювачем електронів. Це було підкреслено під час виконання першої державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ) у 2009 р. На той час були відсутні критерії безпеки, відповідно до яких потрібно було здійснювати проектування та, відповідно, ліцензування установки. Тому першочерговим завданням регулюючого органу було розроблення нового нормативного документа, який містив би сучасний обсяг знань та сучасні вимоги до ядерних установок такого типу. Такий документ був розроблений спільними зусиллями регулюючого органу та ДНТЦ ЯРБ у 2012 р. [2]. В основі документу [2] покладено: накопичений національний досвід щодо ліцензування та регулювання безпеки дослідницьких установок, накопичений міжнародний досвід, зокрема розробки МАГАТЕ в галузі дослідницьких реакторів та підкритичних систем, застосування нормативних вимог для атомних електростанцій із використанням диференційованого підходу. Введення в дію документу [2] відкрило можливість проводити повноцінний аналіз ЯРБ документів щодо ЯПУ «Джерело нейтронів», які надходили від експлуатувальної організації.

2. ПРОЄКТНІ ОСОБЛИВОСТІ ЯПУ «ДЖЕРЕЛО НЕЙТРОНІВ»

Особливістю ADS-системи в порівнянні з традиційною дослідницькою ядерною установкою, наприклад, дослідницьким ядерним реактором, є наявність інтенсивного керуючого джерела нейтронів, яким є прискорювач та нейтронно-утворююча мішень (НУМ). В ADS одержання інтенсивного потоку нейтронів засноване на принципі розмноження первинних фотонейтронів в середовищі з подільного матеріалу. У ЯПУ «Джерело нейтронів» первинні нейтрони генеруються внаслідок фотоядерних реакцій (γ, n) у пластинах НУМ, що викликані бомбардуванням мішені електронами з енергією 100 МеВ і середньою потужністю пучка 100 кВт. Сумарна швидкість генерації нейтронів і, відповідно, щільність нейтронного потоку в активній зоні підкритичної збірки (ПКЗ) визначається інтенсивністю зовнішнього джерела нейтронів та ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів. Зупинення роботи ЯПУ відбувається шляхом вимкнення зовнішнього джерела нейтронів (відключення пучка електронів прискорювача) [5–7]. Ядерна підкритична установка «Джерело нейтронів» функціонально складається з наступних основних елементів: ПКЗ на теплових нейтронах з радіаційним захистом, НУМ для одержання первинних (зовнішніх) нейтронів, яка розташовується усередині активної зони ПКЗ, лінійного прискорювача електронів з каналом транспортування пучка електронів,

експериментальних нейтронних каналів для ядерно-фізичних досліджень та систем інженерно-технічного забезпечення роботи установки в цілому (систем охолодження, електропостачання, спецвентиляції, спецканалізації тощо) [8].

Основою ЯПУ «Джерело нейтронів» є ПКЗ з максимальним ефективним коефіцієнтом розмноження 0,98, що забезпечує її безпеку з погляду на критичність. Підкритична збірка ЯПУ «Джерело нейтронів» є збіркою бакового типу. Тобто всі основні вузли ПКЗ зібрані на опорній плиті, яка знаходиться в циліндричному баку з алюмінійового стопу САВ-1, заповненому водою під атмосферним тиском. Активна зона ПКЗ ЯПУ «Джерело нейтронів» складається з 38 ТВЗ (проектна кількість при використанні вольфрамової НУМ) та НУМ, що оточені радіальним відбивачем нейтронів (рис. 1) [9]. В подальшому передбачено перехід на уранову НУМ з активною зоною у 37 ТВЗ. Використання природного урану замість вольфраму забезпечує більш інтенсивний вихід первинних фотонейтронів. Конструктивно НУМ є зварною конструкцією зі стопу САВ-1 (рис. 2), що складається з наступних основних елементів: головка, патрубки підведення і відведення теплоносія, вікно вакуумної камери,

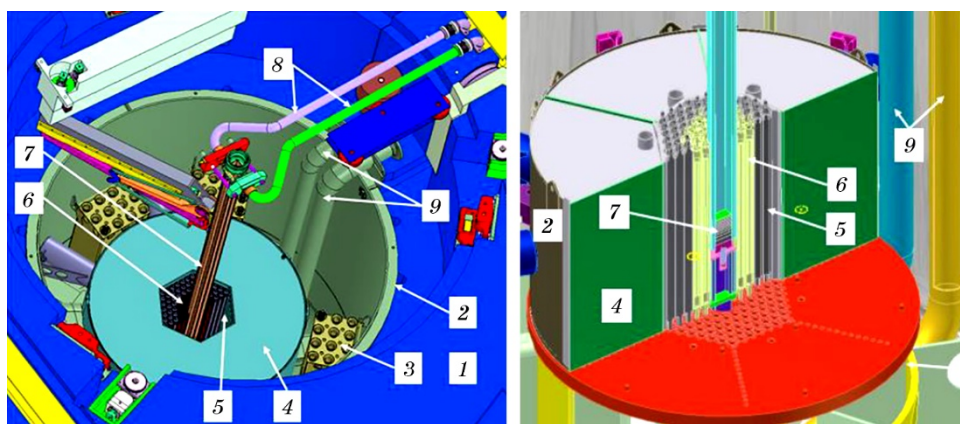


Рис. 1. Компонівка активної зони ЯПУ «Джерело нейтронів» [9]: 1 — біологічний захист, 2 — бак ПКЗ, 3 — навісні стелажі, 4 — кільцевий графітовий відбивач, 5 — елементи берилійового відбивача, 6 — ТВЗ, 7 — НУМ, 8 — вхідний та вихідний канали системи контуру охолодження НУМ, 9 — вхідний та вихідний канали системи контуру охолодження ПКЗ.

Fig. 1. Layout of the NSF 'Neutron Source' core [9]: 1—biological protection, 2—subcritical assembly tank, 3—hinged racks, 4—ring graphite reflector, 5—elements of beryllium reflector, 6—fuel assembly, 7—neutron generating target, 8—input and output channels of the neutron generating target cooling circuit, 9—input and output channels of the subcritical assembly cooling circuit.

гніздо мішені, пластини мішені, гелієва камера, хвостовик.

В активній зоні ПКЗ використовується ТВЗ типу ВВР-М2 (рис. 3), що розташовуються навколо НУМ, утворюючи щільну гексагональну структуру активної зони. Тепловидатна збірка складається з трьох тепловидатних елементів трубчастої форми: двох коаксіальних трубок циліндричної форми і однієї, зовнішньої — шестигранної. Ядерний матеріал серцевини твелів товщиною 1 мм у вигляді порошку діоксиду UO_2 (збагачення за ^{235}U — 19,7%) дисперсно розподілений в алюмінієвій матриці. Для запобігання потрапляння продуктів поділу урану в теплоносій, поверхні тепловидатних елементів покриті захисним шаром стопу САВ-1, товщиною 0,5–0,75 мм з кожного боку [10].

Відбивач нейтронів складається з двох зон. Перша зона знаходиться безпосередньо навколо активної зони ПКЗ та зібрана з декількох рядів берилійових блоків у вигляді шестиграних призм, розмір яких подібний до розміру ТВЗ. Друга, зовнішня зона представлена циліндричним блоком з реакторного графіту. Тепловідведення здійснюється за рахунок циркуляції води, яка одночасно служить сповільнювачем нейтронів [10].

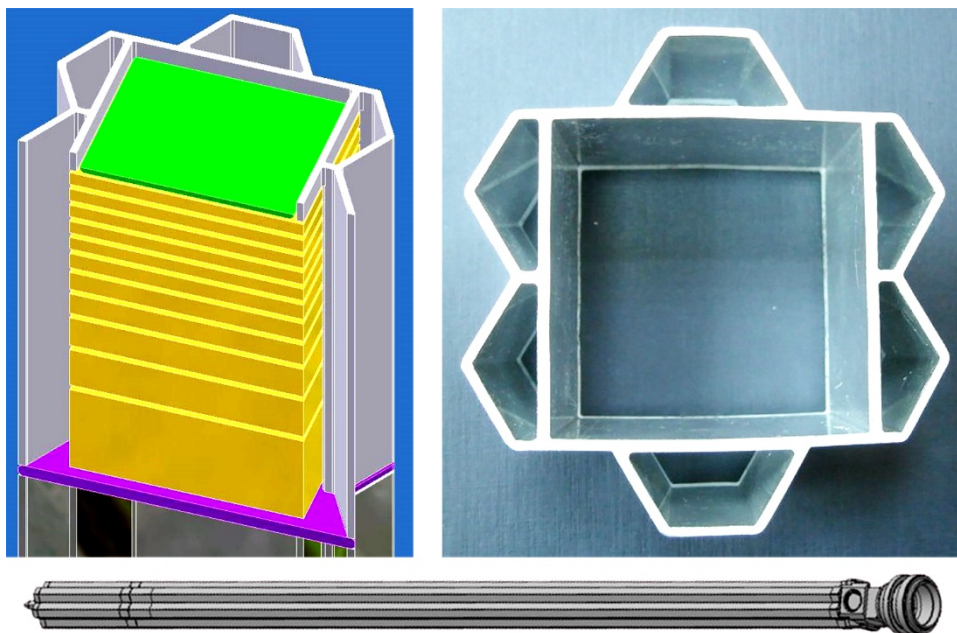


Рис. 2. НУМ ЯПУ «Джерело нейтронів» [11].

Fig. 2. Neutron generating target of NSF 'Neutron Source' [11].

3. ВИКОРИСТАННЯ СТОПУ САВ-1 В ЯДЕРНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

Алюмінієвий стоп САВ-1 є основним конструкційним матеріалом елементів ЯПУ «Джерело нейтронів». САВ-1 відноситься до авіалей — алюмінієвих стопів потрібної системи Al–Mg–Si, що деформуються та термічно зміцнюються, мають високу корозійну стійкість та хорошу корозійно-механічну міцність. Для одержання максимальних механічних властивостей САВ-1 піддають загартуванню й наступному старінню при кімнатній температурі згідно ПНАЕ Г-7-022-90 [14].

Стоп САВ-1 має довгу історію використання у ядерній енергетиці. Його розробили для використання у першому промисловому уран-графітовому реакторі СРСР «А» для одержання зброярського плутонію, який був введений в експлуатацію у 1948 р. під керівництвом І. В. Курчатова [15]. В 50–60^х роках на території колишнього СРСР в рамках прийнятої у 1954 р. загальнодержавної програми по створенню мережі регіональних ядерних центрів з дослідницькими реакторами, яку ініціював академік І. В. Курчатов, було розпочато будівництво дослідницьких реакторів, серед яких були реактори ВВР-М у м. Гатчина та м. Києві [16]. У цей час розроблялись і будувались і інші типи реакторів, наприклад, ВВР-Ц, ВВР-С, ВВР-К,

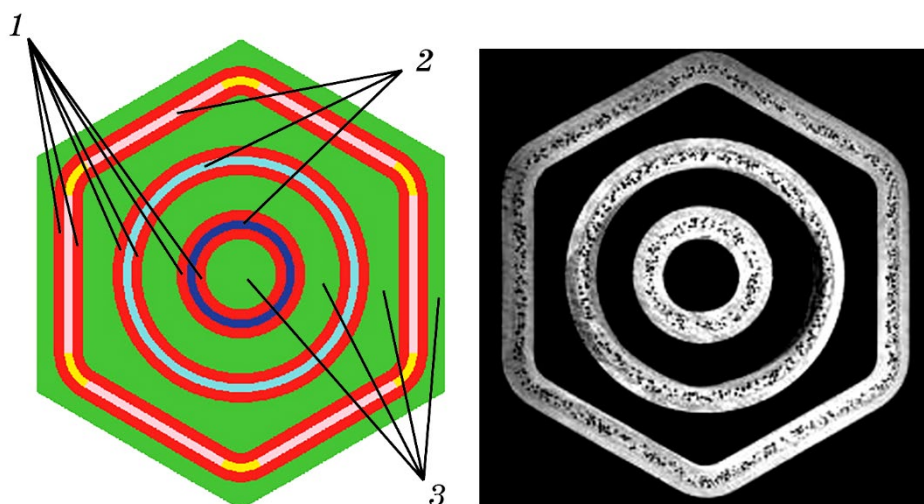


Рис. 3. Поперечний переріз моделю ТВЗ ВВР-М2 [12] та шліф перерізу [13]: 1 — оболонка твелів, 2 — паливна серцевина, 3 — теплоносій.

Fig. 3. Cross section of the fuel assembly ВВР-М2 model [12] and cross section cut [13]: 1 — fuel rods cladding, 2 — fuel meat, 3 — coolant.

ІРТ та інші, у яких також основним конструкційним матеріалом є стоп САВ-1.

Важлива якість, завдяки якій стоп САВ-1 одержав широке застосування в атомній промисловості як конструкційний матеріал реакторної техніки, це те, що продукти активації САВ-1 мають дуже короткі періоди напіврозпаду. Найбільш довготривалим продуктом активації Алюмінію є ізотоп ^{24}Na , який має період напіврозпаду 15 годин. Продукти активації домішок, наприклад, Феруму, мають більші періоди, однак, очікується, що після піврічної витримки елементи зі стопу САВ-1 будуть відноситись до твердих низько активних радіоактивних відходів. Також, важлива властивість, яка дозволяє використовувати цей стоп для елементів активної зони — контрольований вміст Кадмію та Бору, що гарантує високі нейтронно-фізичні характеристики.

4. ЗАСТОСУВАННЯ СТОПУ САВ-1 В ПРОЄКТІ ЯПУ «ДЖЕРЕЛО НЕЙТРОНІВ»

Беручи до уваги високі експлуатаційні і ресурсні характеристики стопу САВ-1, підтверджені багаторічним практичним досвідом його експлуатації в активних зонах діючих дослідницьких реакторів, в тому числі в реакторі ВВР-М Інституту ядерних досліджень НАН України в м. Києві, даний матеріал вибрано в якості основного конструкційного матеріалу ЯПУ «Джерело нейтронів». Стоп САВ-1 для ЯПУ «Джерело нейтронів» вибраний з урахуванням проектних особливостей установки, зокрема: проектних характеристик ЯПУ «Джерело нейтронів» (в тому числі параметрів робочого середовища та очікуваної інтегральної щільності нейтронного потоку), реалізованих механічних навантажень, вимог корозійної стійкості, застосовуваних дезактивувальних розчинів.

Стоп САВ-1 (ОСТ 1 90048-90 [17]) є основним конструкційним матеріалом елементів ЯПУ «Джерело нейтронів», зокрема з цього стопу виготовлено такі основні елементи установки: бак та конструкції всередині бака, навісні стелажі, корпус НУМ, облицювання басейнів витримки відпрацьованих ТВЗ та відпрацьованих НУМ, елементи ТВЗ (рис. 4).

Виробником стопу САВ-1 та елементів ЯПУ зі стопу САВ-1 для ЯПУ «Джерело нейтронів» є ТОВ Науково-виробнича фірма «Сосни» (м. Дімітровград, РФ). Згідно інформації підприємства-виробника, у зв'язку з обмеженістю і специфічністю застосування в сучасній промисловості стопу САВ-1, а також внаслідок потреби для виготовлення елементів ПКЗ широкого сортаменту прокату, було організовано виробництво цільової топки цього стопу, відновлено втрачені галуззю технології термооброблення стопу САВ-1 для забезпечення необхідних міцнісних характеристик, а також відп-

рацьовані та атестовані технології його зварювання [11].

У 50^х роках ХХ століття відзначалися випадки виходу з ладу технологічних каналів ядерних установок, виготовлених з алюмінійового стопу САВ-1. Аналіз причин відмов показав, що цьому сприяло окрихчення стопу, викликане термічним старінням при температурах вище 100°C. Проте, в цілому успішний досвід експлуатації визначив вибір стопу САВ-1 в якості основного конструкційного матеріалу дослідницьких ядерних реакторів басейнового (бакового) типу, так як температура експлуатації була нижче 70°C, що гарантувало відсутність окрихчення [19, 20]. Також було доведено, що технічний алюміній, який містить Ферум, Силіцій, Купрум і інші домішки, може успішно використовуватися в якості матриці дисперсної паливної композиції до температур 100–130°C [21].

Підтвердження відповідності проектних характеристик умовам роботи стопу САВ-1 було одержано за результатами проведення теплогідравлічних та міцнісних розрахунків при проектуванні та обґрунтуванні безпеки ЯПУ «Джерело нейтронів». У свою чергу, під час виконання державної експертизи ЯРБ у ДНТЦ ЯРБ були розроблені свої теплогідравлічні моделі сектору ПКЗ та НУМ і виконані повірочні розрахунки для умов нормальної експлуатації [22] та [23]. За результатами розрахунків максимальні температури оболонки палива та НУМ не перевищують 45°C, що значно нижче умов експлуатації стопу САВ-1 (рис. 5).

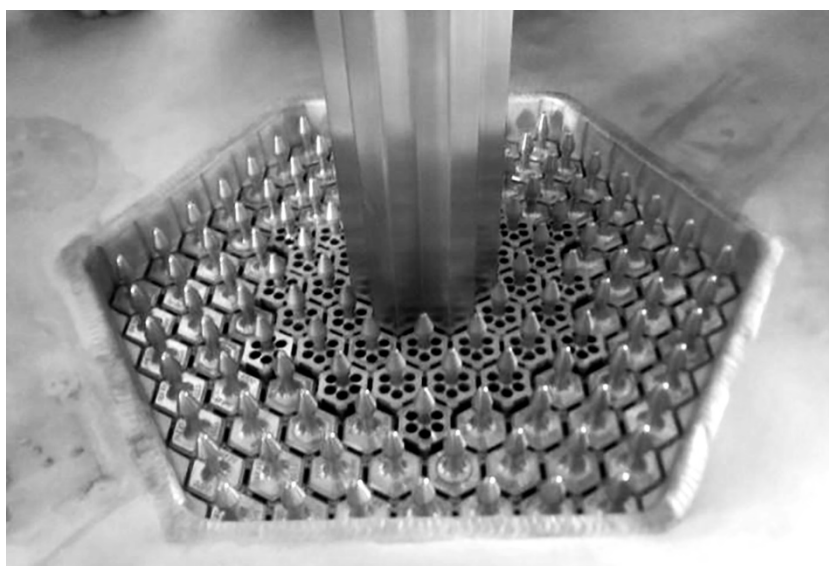


Рис. 4. Активна зона ЯПУ «Джерело нейтронів» з імітаторами ТВЗ [18].

Fig. 4. NSF 'Neutron source' core with fuel assembly imitators [18].

У 80–90^х роках минулого століття фахівці ПІЯФ (Федеральна державна бюджетна установа «Петербурзький інститут ядерної фізики ім. Б. П. Константинова Національного дослідницького центру «Курчатовський інститут», м. Гатчина, РФ) спільно з НДІАР (Акціонерне товариство «Державний науковий центр–Науково-дослідний інститут атомних реакторів», м. Дімітровград, РФ) займалися вивченням впливу нейтронів на механічні властивості стопу САВ-1 і оцінку терміну служби корпусу реактора ВВР-М у м. Гатчина. Вплив нейтронного опромінення на структуру стопу не було виявлено до флюенса $3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Пізніше зразки САВ-1 були опромінені до флюенса $2,6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ і виміряні їх механічні властивості. Матеріал значно знизив пластичність, але залишився досить міцним для умов дослідницьких реакторів. Єдиним обмеженням стала вимога відсутності ударних навантажень [19]. Останнім часом зроблена спроба підтвердити механічні властивості стопу до флюенсу $3,48 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E \geq 0,8 \text{ МэВ}$) [24].

Проектні характеристики ЯПУ «Джерело нейтронів», зокрема не перевищення максимальної температури теплоносія вище 35°C та максимальної інтегральної щільності потоку нейтронів в активній зоні ЯПУ «Джерело нейтронів» $2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}/\text{с}$ (флюенс нейтронів протягом активного етапу експлуатації установки не перевищить 10^{20} см^{-2}), забезпечують проектні міцнісні характеристики елементів зі стопу САВ-1 під час всього терміну експлуатації ЯПУ «Джерело нейтронів».

Активна зона ЯПУ «Джерело нейтронів» набирається з ТВЗ типу ВВР-М2, висока надійність яких підтверджена багаторічною експлуатацією в реакторах ВВР-М. Елементи ВВР-М2 виготовляються зі стопу САВ-1 в тому числі через якості стопу при експлуатації в умовах активних зон реакторів. Тепловидатні збірки типу ВВР-М2 зі збагаченням палива 36% використовувались на дослідницьких реакторах з 1963 р. [25, 26]. Проте, модифікація ТВЗ ВВР-М2, яка

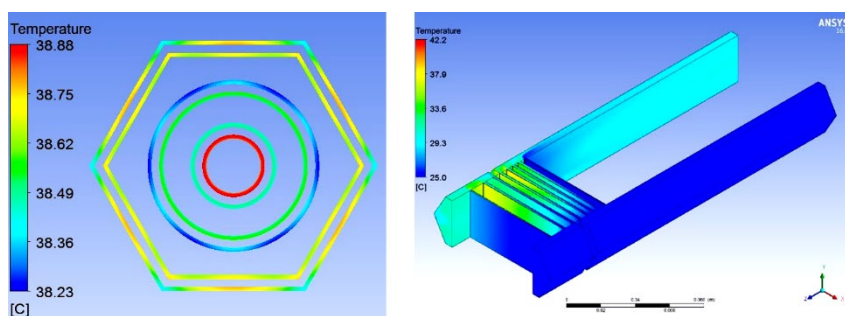


Рис. 5. Результати теплогідрравлічних розрахунків.

Fig. 5. Results of thermohydraulic calculations.

використовується на ЯПУ «Джерело нейтронів», досить нова, і була спроектована наприкінці 1990-х в рамках виконання Програми зменшення збагачення ядерного палива на дослідницьких та випробувальних реакторах (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, RERTR) [27, 28]. У 1994 р. Міністерство атомної енергетики Російської Федерації розпочало програму «Створення тепло-видатних елементів (твелів) і тепловидатних збірок з паливом, збагаченим ураном-235 до 20% для активних зон дослідницьких реакторів» [29]. У 1996 р. на Новосибірському заводі хімконцентратів (НЗХК) було виготовлено п'ять тестових зразків ТВЗ [30], вони були випробувані на цілісність [31], до 2001 року опромінені у реакторі ВВР-М (м. Гатчина, РФ) до глибини вигорання $\approx 75\%$ [32], і згодом почалось серійне виробництво цього палива. На початку 2006 р. на НЗХК було розпочато серійне виробництво ТВЗ типу ВВР-М2 із збагаченням по урану-235 нижче 20% для дослідницьких реакторів [29]. Трубочасті твели виготовляються методом екструзії (видавлювання) або волочіння. Ці методи використовуються для одержання твелів з великим відношенням розмірів поперечного перерізу до довжини. Методу екструзії (спільного видавлювання) застосовують для виготовлення твелів на основі легкодеформівних металів (Al), а також жароміцних стопів (нержавіюча сталь). Трубочасті дисперсійні твели можуть бути виготовлені і методом волочіння. Основна мета цієї методи — забезпечити щільний контакт між паливним сердечником і оболонкою твела [21]. На НЗХК використовується метода екструзії [13].

В рамках Програми RERTR на низькозбагачене паливо ВВР-М2 був переведений і дослідницький реактор ВВР-М (ІЯД, м. Київ). Були розроблені обґрунтування безпеки зберігання свіжого та відпрацьованого ядерного палива [33], обґрунтування безпеки переведення та експлуатації реактора ВВР-М на низькозбагаченому паливі [34], які пройшли державну експертизу ЯРБ і у 2005 р. одержали погодження Держатомрегулювання на використання низькозбагаченого палива на реакторі ВВР-М. Саме, для реактора ВВР-М ІЯД і було виконано більшість розрахунків та обґрунтувань безпеки використання низькозбагаченого палива типу ВВР-М2. Для експлуатації в ядерних дослідницьких установках України НЗХК виробляє ТВЗ ВВР-М2 з довжиною паливної серцевини 50 см. У той час, як для дослідницьких реакторів у Європі та Азії виготовляються ТВЗ ВВР-М2 з подовженою до 60 см паливною серцевиною та дещо іншими параметрами ядерного палива. За час експлуатації ТВЗ ВВР-М2 не було зафіксовано експлуатаційних подій пов'язаних з стопом САВ-1.

5. ВИСНОВОК

У ННЦ ХФТІ НАН України наразі триває етап фізичного пуску но-

вітньої дослідницької ядерної установки, що на сьогодні не має аналогів у світі. Незважаючи на новизну ЯПУ «Джерело нейтронів» при її проектуванні та будівництві одним з основних принципів було використання накопиченого досвіду з проектування, будівництва та експлуатації дослідницьких установок з урахуванням специфіки ЯПУ «Джерело нейтронів». Зокрема, позитивний досвід застосування алюмінійового стопу САВ-1 в якості основного конструкційного матеріалу корпусу та внутрішньокорпусних пристроїв дослідницьких реакторів, які експлуатуються з 50-х років ХХ століття, свідчить про його високі міцнісні, теплофізичні, нейтроннофізичні і корозійні властивості для умов експлуатації ЯПУ «Джерело нейтронів».

Технологічні процеси, матеріали, технічні та організаційні рішення, які застосовуються на ЯПУ «Джерело нейтронів», апробовані при експлуатації енергетичних або дослідницьких ядерних установок, критичних і підкритичних збірок, прискорювачів заряджених частинок та прийнятність їх використання підтверджена результатами досліджень, випробувань і одержала погодження за результатами державної експертизи ЯРБ.

Зазначені передумови забезпечують безаварійну експлуатацію ЯПУ «Джерело нейтронів» протягом проектного терміну з погляду використаних конструкційних матеріалів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. І. М. Карнаухов, *Вісник Національної академії наук України*, № 12: 15 (2015).
2. *Загальні положення безпеки ядерної підкритичної установки НП 306.2.183-2012*.
3. *Правила ядерной безопасности подкритических стенов. ПБЯ-01-75* (Москва: Госатомнадзор СССР: 1975).
4. *Общие положения обеспечения безопасности исследовательских реакторов при проектировании, сооружении и эксплуатации* (Москва: Госатомэнергонадзор СССР: 1988).
5. *Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development. IAEA-TECDOC-1766* (Vienna: International Atomic Energy Agency: 2015).
6. V. Arkhipov, *IAEA Bulletin*, **39-2**: 30 (1997).
7. Y. Gohar and Donald L. Smith, *YALINA Facility A Sub-Critical Accelerator-Driven System (ADS) for Nuclear-Energy Research Facility Description and an Overview of the Research Program (1997–2008)* (Argonne: Argonne National Laboratory: 2010).
8. Y. Gohar, I. Bolshinsky, and I. Karnaukhov, *International Workshop on Technology and Components of Accelerator-Driven Systems (May 21–23, 2013)* (Le Seine Saint-Germain: 2015), p. 254.
9. О. В. Кухоцький, *Аналіз безпеки дослідницьких ядерних установок з використанням CFD технологій* (Автореф. дис. ... канд. техн. наук) (Київ: Ін-

- ститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України: 2020).
10. М. І. Айзацький, Б. В. Борц, О. М. Водін, П. О. Демченко, А. Ю. Зелінський, І. М. Карнаухов, В. А. Кушнір, В. В. Митроченко, А. О. Мициков, І. М. Неклюдов, С. М. Олійник, Ф. А. Пеєв, Г. Д. Пугачов, С. А. Солдатов, І. В. Ушаков, Й. Гохар, І. Большинський, Я. Л. Чи, С. Л. Пей, С. Х. Ванг, В. Б. Ліу, *ВАНТ*, № 3 (79): 3 (2012).
 11. А. А. Иващенко, С. В. Комаров, А. Ю. Леценко, А. Ю. Зелінський, І. М. Карнаухов, А. О. Мыцыков, И. В. Ушаков, Н. Ф. Шульга, *Доклады V Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2018) (2–5 октября, 2018)* (Москва: 2018), с. 316.
 12. Yousry Gohar, *Proc. 3rd Annual Idaho ADSS Experimental Workshop (June 1–2, 2005)* (Idaho: Idaho Accelerator Center: 2005).
 13. *Ядерное топливо исследовательских реакторов. Буклет НЗХК.*
 14. ПНАЭ Г-7-022-90. *Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Дуговая сварка алюминиевых сплавов в защитных газах: основные положения* (Москва: Государственный комитет СССР по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и атомной энергетике: 1991).
 15. Б. А. Габараев, Г. В. Киселев, Б. В. Лысиков, В. В. Пичугин, *История создания первого в СССР уран-графитового реактора «А» комбината № 817 (в документах)* (Москва: ОАО «НИКИЭТ»: 2009).
 16. *40 років нейтронних досліджень на реакторі ВВР-М* (Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України: 2000).
 17. *ОСТ 1 90048-90. Сплавы алюминиевые деформируемые повышенной чистоты. Марки.*
 18. Yousry Gohar, Igor Bolshinsky, and Ivan Karnaukhov, *Proc. EuCARD2-Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development (February 7–9, 2016)* (CERN: 2016).
 19. В. И. Диденко, К. А. Коноплев, А. С. Полтавский, О. П. Якорев, *ПИЯФ-XXV Основные направления научной деятельности. Отделение нейтронных исследований* (Гатчина: ПИЯФ РАН: 1996), с. 144.
 20. И. А. Чусов, А. С. Шелегов, О. Ю. Кочнов, *Известия вузов. Ядерная энергетика*, № 3: 116 (2016).
 21. С. В. Алексеев, В. А. Зайцев, С. С. Толстоухов, *Дисперсионное ядерное топливо* (Москва: Техносфера: 2015).
 22. О. Kukhotskyi, I. Bilodid, A. Shepichak, and S. Nemtsova, *Ядерна та радіаційна безпека*, № 4 (84): 18 (2019).
 23. О. V. Kukhotskyi and A. V. Nosovskiy, *Ядерна енергетика та довілля*, № 1 (16): 31 (2020).
 24. О. В. Голубева, В. А. Петров, Е. А. Иваненко, А. М. Морозов, С. Р. Фридман, Б. С. Родченков, А. В. Васильев, *Материалы XI конференции по реакторному материаловедению, посвященная 55-летию отделения реакторного материаловедения НИИАР (27–31 мая, 2019)* (Димитровград: 2019), с. 259.
 25. *Реактору ВВР-М — 50 лет* (Гатчина: Издательство ПИЯФ РАН: 2009).
 26. A. N. Erykalov, V. S. Zvezdkin, A. S. Zakharov, K. A. Konoplev, Yu. V. Petrov, and Yu. P. Sajkov, *Proc. International Symposium on Research Reactor Safety Operations and Modifications (Oct. 23–27, 1989)* (Chalk River: 1989), p. 709.
 27. А. А. Enin, А. N. Erykalov, А. S. Zakharov, V. S. Zvezdkin, G. A. Kirsanov,

- K. A. Konoplev, V. S. L'vov, Yu. V. Petrov, and Yu. P. Saikov, *ENS RRFM '97 1st International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management (February 5–7, 1997)* (Bruges: 1997), p. 168.
28. A. Travelli, *U.S.–Argentina–Brazil Conference on Peaceful Uses of Nuclear Energy and Nonproliferation (April 19–21, 1994)* (San Carlos de Bariloche: 1994), p. 12.
29. A. S. Diakov, *Science and Global Security*, **22**, Iss. 3: 166 (2014).
30. R. B. Pond, N. A. Hanan, J. E. Matos, Y. Mahlers, and A. Dyakov, *24th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) (November 3–8, 2002)* (San Carlos de Bariloche: 2002).
31. G. A. Kirsanov, K. A. Konoplev, Yu. P. Saikov, and A. S. Zakharov, *21st International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) (October 18–23, 1998)* (Sao Paulo: 1998).
32. K. A. Konoplev, R. G. Pikulik, A. S. Zakharov, L. V. Tedoradze, G. V. Paneva, D. V. Tchmshkyan, *24th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) (November 3–8, 2002)* (San Carlos de Bariloche: 2002).
33. Y. P. Mahlers and A. G. Dyakov, *27th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) (November 6–10, 2005)* (Boston: 2005).
34. Y. P. Mahlers, V. M. Makarovskiy, I. A. Maliuk, and O. F. Rudyk, *33rd RERTR 2011 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (Oct. 23–27, 2011)* (Santiago: 2011).

REFERENCES

1. I. M. Karnaukhov, *Visnyk Natsional'noyi Akademiyi Nauk Ukrainy*, No. 12: 15 (2015) (in Ukrainian).
2. *Zahal'ni Polozhennya Bezpeky Yadernoyi Pidkrytychnoyi Ustanovky NP 306.2.183-2012* [General Safety Provisions of the Nuclear Subcritical Installation NP 306.2.183-2012] (in Ukrainian).
3. *Pravila Yadernoy Bezopasnosti Podkriticheskikh Stendov. PBYa-01-75* [Nuclear Safety Rules for Subcritical Test Facilities. PBYa-01-75] (Moscow: Gosatomnadzor SSSR: 1975) (in Russian).
4. *Obshchie Polozheniya Obespecheniya Bezopasnosti Issledovatel'skikh Reaktorov pri Proektirovanii, Sooruzhenii i Ekspluatatsii* [General Provisions for Ensuring the Safety of Research Reactors during Design, Construction and Operation] (Moscow: Gosatomenerg nadzor SSSR: 1988) (in Russian).
5. *Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development. IAEA-TECDOC-1766* (Vienna: International Atomic Energy Agency: 2015).
6. V. Arkhipov, *IAEA Bulletin*, **39-2**: 30 (1997).
7. Y. Gohar and Donald L. Smith, *YALINA Facility A Sub-Critical Accelerator-Driven System (ADS) for Nuclear-Energy Research Facility Description and an Overview of the Research Program (1997 – 2008)* (Argonne: Argonne National Laboratory: 2010).
8. Y. Gohar, I. Bolshinsky, and I. Karnaukhov, *International Workshop on Technology and Components of Accelerator-Driven Systems (May 21–23, 2013)* (Le Seine Saint-Germain: 2015), p. 254.

9. O. V. Kukhots'kyi, *Analiz Bezpeky Doslidnyts'kykh Yadernykh Ustanovok z Vykorystannyam CFD Tekhnolohiy* [Safety Analysis of Nuclear Research Facilities using CFD Technologies] (Thesis of Dissert. for PhD Techn. Sci.) (Kyiv: 2020) (in Ukrainian).
10. M. I. Ayzats'kyi, B. V. Borts, O. M. Vodin, P. O. Demchenko, A. Yu. Zelins'kyi, I. M. Karnaukhov, V. A. Kushnir, V. V. Mytrochenko, A. O. Mytsykov, I. M. Neklyudov, S. M. Oliynyk, F. A. Pyeyev, H. D. Puhachov, S. A. Soldatov, I. V. Ushakov, Y. Hokhar, I. Bol'shyns'kyi, Ya. L. Chy, S. L. Pey, S. Kh. Vanh, and V. B. Liu, *VANT*, No. 3 (79): 3 (2012) (in Ukrainian).
11. A. A. Ivashchenko, S. V. Komarov, A. Yu. Leshchenko, A. Yu. Zelinskiy, I. M. Karnaukhov, A. O. Mytsykov, I. V. Ushakov, and N. F. Shul'gav, *Doklady V Mezhdunarodnoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii «Innovatsionnye Proekty i Tekhnologii Yadernoy Energetiki» (MNTK NIKIET-2018) (Oct. 2–5, 2018)* (Moscow: 2018), p. 316 (in Russian).
12. Yousry Gohar, *Proc. 3rd Annual Idaho ADSS Experimental Workshop (June 1–2, 2005)* (Idaho: Idaho Accelerator Center: 2005).
13. *Yadernoe Topливо Issledovatel'skikh Reaktorov. Buklet NZKhK* [Nuclear Fuel for Research Reactors. Buklet NFCC] (in Russian).
14. *PNAE G-7-022-90. Oborudovanie i Truboprovody Atomnykh Energeticheskikh Ustanovok. Dugovaya Svarka Alyuminievyykh Splavov v Zashchitnykh Gazakh: Osnovnye Polozheniya* [PNAE G-7-022-90. Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants. Gas-Shielded Arc Welding of Aluminium Alloys: Fundamentals] (Moscow: Gosudarstvennyy Komitet SSSR po Nadzoru za Bezopasnym Vedeniem Rabot v Promyshlennosti i Atomnoy Energetike: 1991) (in Russian).
15. B. A. Gabaraev, G. V. Kiselev, B. V. Lysikov, and V. V. Pichugin, *Istoriya Sozdaniya Pervogo v SSSR Uran-Grafitovogo Reaktora 'A' Kombinata No. 817 (v Dokumentakh)* [The History of the Creation of the First in the USSR Uranium-Graphite Reactor 'A' at Combine No. 817 (in Documents)] (Moscow: OAO 'NIKIET': 2009) (in Russian).
16. *40 Rokiv Neytronnykh Doslidzhen' na Reaktori VVR-M* [40 Years of Neutron Research at the VVR-M Reactor] (Kyiv: Instytut Yadernykh Doslidzhen' NAN Ukrayiny: 2000) (in Ukrainian).
17. OST 1 90048-90. *Splavy Alyuminievye Deformiruemye Povyshennoy Chistoty. Marki* [OST 1 90048-90. High Purity Wrought Aluminium Alloys. Marks] (in Russian).
18. Yousry Gohar, Igor Bolshinsky, and Ivan Karnaukhov, *Proc. EuCARD2-Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development (February 7–9, 2016)* (CERN: 2016).
19. V. I. Didenko, K. A. Konoplev, A. S. Poltavskiy, and O. P. Yakorev, *PIYaF-XXV Osnovnye Napravleniya Nauchnoy Deyatel'nosti. Otdelenie Neytronnykh Issledovaniy* [The Main Directions of Scientific Activity. Department of Neutron Research] (Gatchina: PIYaF RAN: 1996), p. 144 (in Russian).
20. I. A. Chusov, A. S. Shelegov, and O. Yu. Kochnov, *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*, No. 3: 116 (2016) (in Russian).
21. S. V. Alekseev, V. A. Zaytsev, and S. S. Tolstoukhov, *Dispersionnoe Yadernoe Topливо* [Dispersed Nuclear Fuel] (Moscow: Tekhnosfera: 2015) (in Russian).
22. O. Kukhotskyi, I. Bilodid, A. Shepichak, and S. Nemtsova, *Yaderna ta Radiatsiyina Bezpeka*, No. 4 (84): 18 (2019).
23. O. V. Kukhotskyi and A. V. Nosovskiy, *Yaderna Enerhetyka ta Dovkillya*, No. 1

- (16): 31 (2020).
24. O. V. Golubeva, V. A. Petrov, E. A. Ivanenko, A. M. Morozov, S. R. Fridman, B. S. Rodchenkov, and A. V. Vasil'ev, *Materialy XI Konferentsii po Reaktornomu Materialovedeniyu, Posvyashchennaya 55-Letiyu Otdeleniya Reaktornogo Materialovedeniya NIIAR (May 27–31, 2019)* (Dimitrovgrad: 2019), p. 259 (in Russian).
 25. *Reaktoru VVR-M—50 Let* [Reactor VVR-M is 50] (Gatchina: Izdatel'stvo PIYaF RAN: 2009) (in Russian).
 26. A. N. Erykalov, V. S. Zvezdkin, A. S. Zakharov, K. A. Konoplev, Yu. V. Petrov, and Yu. P. Sajkov, *Proc. International Symposium on Research Reactor Safety Operations and Modifications (Oct. 23–27, 1989)* (Chalk River: 1989), p. 709.
 27. A. A. Enin, A. N. Erykalov, A. S. Zakharov, V. S. Zvezdkin, G. A. Kirsanov, K. A. Konoplev, V. S. L'vov, Yu. V. Petrov, and Yu. P. Saikov, *ENS RRFM '97 1st International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management (February 5–7, 1997)* (Bruges: 1997), p. 168.
 28. A. Travelli, *U.S.–Argentina–Brazil Conference on Peaceful Uses of Nuclear Energy and Nonproliferation (April 19–21, 1994)* (San Carlos de Bariloche: 1994), p. 12.
 29. A. S. Diakov, *Science and Global Security*, **22**, Iss. 3: 166 (2014).
 30. R. B. Pond, N. A. Hanan, J. E. Matos, Y. Mahlers, and A. Dyakov, *24th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) (November 3–8, 2002)* (San Carlos de Bariloche: 2002).
 31. G. A. Kirsanov, K. A. Konoplev, Yu. P. Saikov, and A. S. Zakharov. *21st International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) (October 18–23, 1998)* (Sao Paulo: 1998).
 32. K. A. Konoplev, R. G. Pikulik, A. S. Zakharov, L. V. Tedoradze, G. V. Paneva, D. V. Tchmshkyan, *24th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) (November 3–8, 2002)* (San Carlos de Bariloche: 2002).
 33. Y. P. Mahlers and A. G. Dyakov, *27th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) (November 6–10, 2005)* (Boston: 2005).
 34. Y. P. Mahlers, V. M. Makarovskiy, I. A. Maliuk, and O. F. Rudyk, *33rd RERTR 2011 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (Oct. 23–27, 2011)* (Santiago: 2011).