

# СИФОННИЙ ЕФЕКТ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ БЕЗПЕЧНОГО РЕЖИМУ ЦИРКУЛЯЦІЇ ТЕПЛОНОСІЯ У БАКУ ЯДЕРНОЇ ПІДКРИТИЧНОЇ УСТАНОВКИ «ДЖЕРЕЛО НЕЙТРОНІВ»

*О.В. Бихун, А.О. Мициков, В.М. Рідозуб*  
*Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»,*  
*Харків, Україна*  
*E-mail: bykhun2017@gmail.com*

Наведено параметри гідравлічної системи циркуляції теплоносія у баку підкритичної збірки ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів». Після тривалого простою проведені іспити, що підтвердили працездатність безпечної експлуатації системи охолодження активної зони. Отримано чисельні характеристики, що повинні бути підтверджені перед початком дослідно-промислової експлуатації.

## ВВЕДЕННЯ

Протягом 2020–2021 років у ННЦ ХФТІ було виконано фізичний пуск ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів», засноване на підкритичній збірці, що керується прискорювачем електронів (ЯПУ «Джерело нейтронів») [1, 2], в ході якого попередньо завантажені імітатори паливних збірок було послідовно замінено свіжим ядерним паливом у вигляді односекційних тепловиділяючих збірок (ТВЗ) типу ВВР-М2 [3].

Згідно із проектом ЯПУ «Джерело нейтронів» [4, 5] режим роботи передбачає виділення з активної зони 260 кВт теплової потужності, яка відводиться теплоносієм системи першого контуру охолодження підкритичної збірки.

Нижче наведено результати експериментальних досліджень роботи гідравлічної системи циркуляції теплоносія у баку підкритичної збірки ЯПУ «Джерело нейтронів».

## 1. ОПИС ПІДКРИТИЧНОЇ ЗБІРКИ

На момент завершення фізичного пуску активна зона підкритичної збірки містила 37 ТВЗ, 1 імітатор паливної збірки та 82 елемента берилієвого відбивача нейтронів. У подальшому в зв'язку з виниклою необхідністю переведення установки у режим тривалої зупинки 2 елемента берилієвого відбивача було замінено на поглинаючі стрижні.

На Рис. 1 та 2 наведено конструкцію односекційної ТВЗ типу ВВР-М2 та елемента берилієвого відбивача нейтронів відповідно.

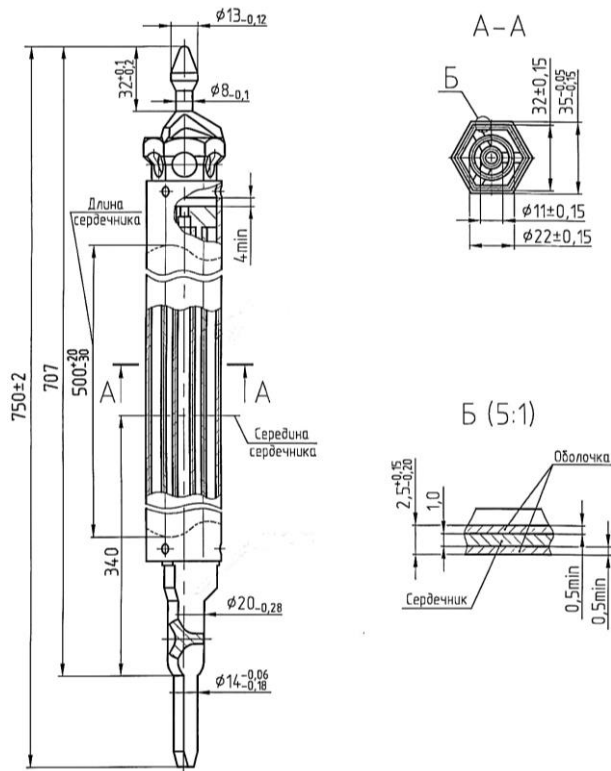


Рис. 1. Конструкція односекційної ТВЗ ВВР-М2 [3]

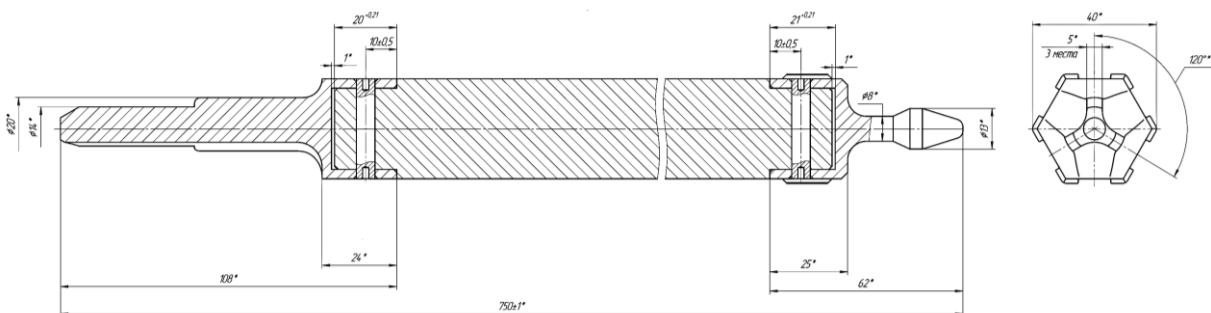


Рис. 2. Конструкція елемента берилієвого відбивача нейтронів

Активна зона знаходиться в баку підкритичної збірки (ПКЗ), через яку проходить циркуляція теплоносія (демінералізованої води) наступним чином (Рис. 3). Вода з баку через активну зону та елементи трубопроводу А-В-С-D-E всмоктується відцентровим насосом і далі через теплообмінник повертається до баку ПКЗ. Насос знаходиться на позначці 1,745 м нижче за рівень води в баку ПКЗ. Тому одним із аспектів забезпечення безпеки є урахування можливості осушення активної зони за рахунок сифонного ефекту. Схема відведення води по суті містить 2 сифони. Один – ділянка А-С (див. Рис. 3), містить верхнє коліно. Другий – ділянка С-Е, містить нижнє коліно. Зрив першого сифону великою мірою залежить від стану запірної арматури на верхній частині кришки буферного бака (Е22) і параметрів антисифонної врізки, що у баку ПКЗ. Подальше присвячено опису гідравлічних

параметрів ділянки відкачування, тобто місця найвірогіднішого виникнення сифонного ефекту та його зриву для недопущення осушення активної зони.

## 2. ПАРАМЕТРИ ГІДРАВЛІЧНОГО СПРОТИВУ ВІДКАЧНОГО УЧАСТКУ

### 2.1. ПАРАМЕТРИ ГІДРАВЛІЧНОГО СПРОТИВУ АКТИВНОЇ ЗОНИ

Активна зона зібрана з берилійових відбивачів, паливних елементів або імітаторів, що мають гідравлічні параметри еквівалентні ТВЗ. Як очевидно з Рис. 1 та 2, активна зона, з точки зору гідравлічного опору, являє собою набір трубок різного перерізу. Маємо 522 паралельні канали завдовжки 500 мм, розподілені в шестикутнику, який вписаний в діаметр 245 мм (див. Рис. 3, 4).

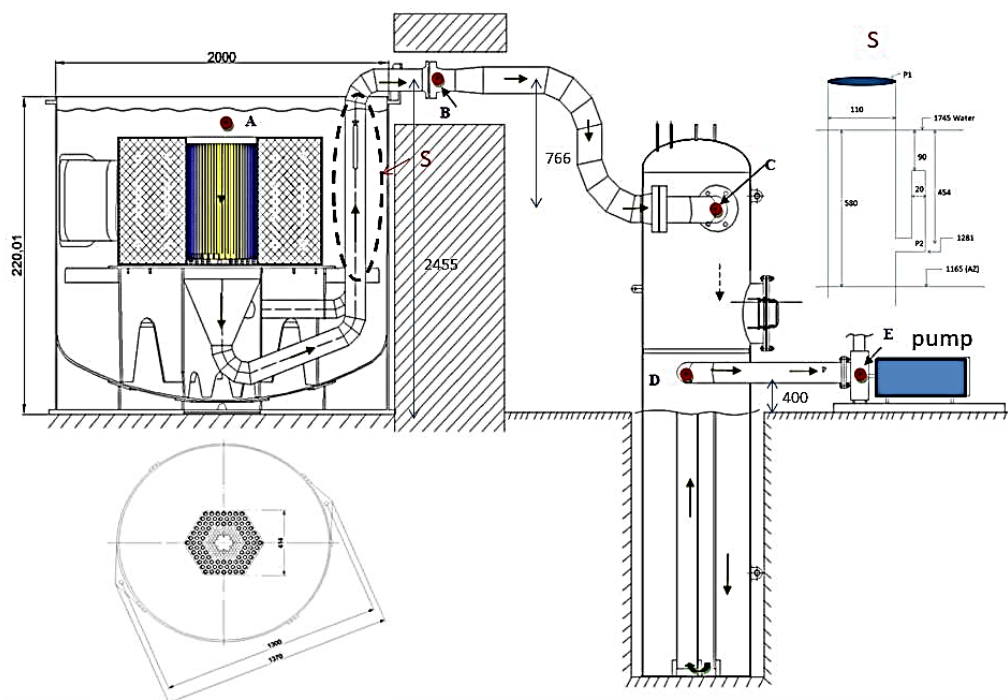


Рис. 3. Схема руху теплоносія у першому контурі охолодження підкритичної збірки

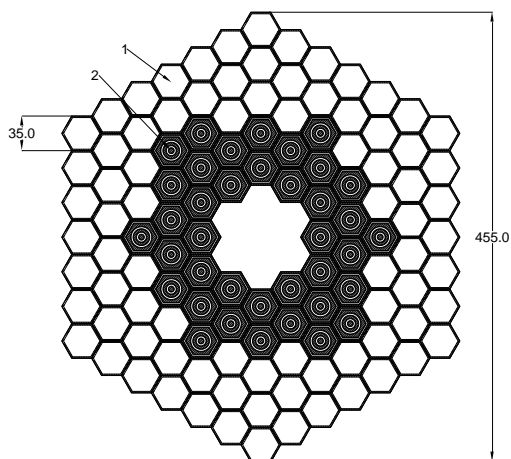


Рис.4. Конфігурація активної зони

Для опису активної зони, з точки зору її охолодження, розумно застосувати каналну модель. Між елементами існують проміжки – прямокутники. У середині паливних елементів є 2 кільцевих і 1 циліндричний прохід. Отже, існує 5 типів каналів.

Параметри каналів зведені в Табл. 1. При розрахунку бралось до уваги таке. Для кожного каналу падіння тиску  $\Delta P_i$  складається з двох складових. Перше враховує тертя за довжиною каналу, друге враховує локальні втрати, що виникають при збуренні течії (вхід-вихід, зміна швидкості як за величиною, так і за напрямом) [6, 7]:

$$\Delta P_i = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{\rho V_i^2}{2} + \xi \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

де  $\lambda = 64/Re$  ( $Re < 2300$ );  $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$  ( $Re > 4500$ );

число Рейнольдса  $Re = VD_h/\nu$ ;

кінематична в'язкість  $\nu \approx 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

гідравлічний діаметр прямокутника  $D_h = 2ab/(a+b)$ ;

гідралічний діаметр кільця  $D_h = D_1 - D_2$ ;

$\xi = 0,5$  для входу в канал;

$\xi = 1$  для виходу з каналу.

Для всіх каналів повинно виконуватися

$$Q_{tot} = \sum n_i * Q_i \quad (2)$$

та

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_i = \dots = \Delta P. \quad (3)$$

Для витрати води 80 м<sup>3</sup>/год маємо такі результати. Загальний прохідний переріз активної зони дорівнює 0,036 м<sup>2</sup>. Площа, якою охолоджуються ТВЗ, – 0,022 м<sup>2</sup>. При загальній

витраті 80 м<sup>3</sup>/год (22 л/с) потік на охолодження ТВЗ – 48 м<sup>3</sup>/год (13,5 л/с). Такі значення використані у проекті ЯПУ «Джерело нейтронів».

Оцінки, засновані на моделі паралельних каналів, дають загальне падіння тиску в активній зоні 1 кПа. Слід зазначити, що у [3] наведено значення падіння тиску в активній зоні 11 кПа при швидкості води в каналі між ТВЗ 2,2 м/с. Це значення добре співвідноситься з перепадом тиску в активній зоні при швидкості в аналогічному каналі 0,622 м/с.

Таблиця 1

Параметри каналів охолодження елементів активної зони підкритичної збірки

Тип каналу	Кількість каналів	Площа А, мм <sup>2</sup>	Загальна площа, мм <sup>2</sup>	Гідралічний діаметр D <sub>h</sub> , мм	Расход, м <sup>3</sup> /ч	Швидкість V, м/с	Число Рейнольдса, R
Прямокутник 19,34x1,5 мм	96	29	2784	2,78	4,4	0,44	1529
Прямокутник 19,34x3 мм	312	58	18096	5,19	39	0,62	4022
Кільце-шестигранник D, вписаний 27 /D 22 мм	38	250.6	9523	6,34	22,6	0,66	5230
Кільце D17 /D 11 мм	38	132	5016	6	11,6	0,64	4800
Циліндр D 6 мм	38	28,27	1074	6	2,5	0,63	4725

## 2.2. ПАРАМЕТРИ ПАДІННЯ ТИСКУ НА ДІЛЯНЦІ АКТИВНА ЗОНА – ГОЛОВНИЙ ЦИРКУЛЯЦІЙНИЙ НАСОС

Використовуючи методики, наведені в [6, 7], втрати в трубопроводі від активної зони до насоса склали 14 кПа. Це добре співвідноситься з проектними параметрами нормальної експлуатації (тиск на вході в циркуляційні насоси 0,07...0,08 МПа).

Для ділянки від поверхні бака ПКЗ до фланця циркуляційного насоса (див. ділянка А-Е, Рис. 3) характеристика системи має вигляд:

$$\Delta P = P_L \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 = 13642 \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 = 27,610^6 Q^2 \text{ [Па]}, \quad (4)$$

де  $P_L$  – падіння тиску на ділянці при витраті  $Q$ .

Для ділянки від поверхні бака ПКЗ до буферного бака Е22 (див. ділянка А-С, Рис. 3) характеристика системи має вигляд:

$$\Delta P = P_L \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 = 9762 \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 = 19768050 Q^2 \text{ [Па]}. \quad (5)$$

Для ділянки від поверхні бака ПКЗ до врізання антисифонної трубки характеристика системи має вигляд:

$$\Delta P = P_L \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 = 4066 \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 = 8233650 Q^2 \text{ [Па]}. \quad (6)$$

Ця характеристика дає можливість розрахувати режими роботи антисифонної вставки за різних аварійних ситуаціях.

Напір, що створюється стовпом води  $H$ , витрачається на подолання опору труби, що всмоктує ( $\Delta P$ ), і на створення кінетичної енергії потоку (швидкісний напір на виході). Рівняння у метрах водяного стовпа (м вод. ст.):

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} = H, \quad (7)$$

що дає

$$\frac{27625050 \cdot Q^2}{\rho \cdot g} + \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D_{out}^4} = H \quad (8)$$

чи

$$\frac{27625050 \cdot \pi^2 \cdot D_{out}^4 \cdot V^2}{16 \cdot \rho \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} = H. \quad (9)$$

Для нашого випадку  $D_{out}=0,1$  м отримаємо

$$Q = 0,0165 \cdot \sqrt{H}; \quad V = 2,10 \cdot \sqrt{H}. \quad (10)$$

При цьому швидкість через трубу с антисифонним патрубком

$$V_s = 1,736 \cdot \sqrt{H}. \quad (11)$$

Часові залежності в умовах зливу через вільний отвір мають вигляд:

швидкість падіння рівня води у баку

$$V_t = \frac{Q}{S_t} = \frac{0,0165}{S_t} \cdot \sqrt{H}; \quad \frac{dH}{dt} = -0,021 \cdot \sqrt{H}, \quad (12)$$

де  $S_t$  – площа поверхні бака ПКЗ

$$H = 1,745 - 0,0069 \cdot t + 6,9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2. \quad (13)$$

Отже, у разі відсутності зриву сифонного зливу, бак ПКЗ осушиться досить швидко. Параметри цього процесу наведено у Табл. 2.

Параметри зниження рівня бака ПКЗ при самовитіканні

Рівень у баку ПКЗ, мм	Витрата, л/с	Час, с	Швидкість рівня у баку ПКЗ, мм/с	Швидкість у трубі D110, м/с	Швидкість у трубі D100, м/с	Розрідження у точці врізання антисифона, Па
1745	21,7	0.	6,9	2,3	2,77	2097
1655	21,2	13,1	6,75	2,23	2,7	2639
1281	18,7	72.	5,9	1,96	2,37	4893
1165	17,8	92.	5,6	1,87	2,26	5592

Розглянемо процеси, що відбуваються при досягненні рівня води у баку ПКЗ антисифонної трубки. Загальний тиск у місці врізання антисифонної трубки дорівнює

$$P = P_a + \rho \cdot g \cdot h_{as} - P_L - \Delta P_{as}, \quad (14)$$

де  $P_a$  – атмосферний тиск;  $h_{as}$  – глибина врізання антисифонної трубки (0,4 м);  $P_L$  – розрідження, спричинене падінням тиску при русі рідини вздовж забірної труби;  $\Delta P_{as}$  – гідравлічне розрідження в трубі. Відповідно до Табл. 2 у точці врізання антисифонної труби (ділянка 1–6)  $P_L=4000$  Па. Тому гідростатичний член  $\rho g h_{as} \approx 4000$  Па компенсується.

Згідно із законом Бернуллі

$$\Delta P_{as} = \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \frac{997 \cdot 1,736^2}{2}. \quad (15)$$

На висоті 1651 мм (верхівка антисифонної трубки) виникає підсмоктування повітря через трубу D 0,11 м тиском:

$$\Delta P = \frac{997 \cdot 1,736 \cdot \sqrt{1,655}}{2} = 2639 \text{ [Па]}. \quad (16)$$

Цей тиск можна переписати у вигляді динамічного тиску повітря

$$\Delta P = \frac{\rho_{air} \cdot v_{air}^2}{2} \rightarrow v_{air} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{air}}}. \quad (17)$$

Отже, повітря всмоктується зі швидкістю  $v_{air}=65,6$  м/с. На кінці антисифонної труби стоїть діафрагма, завдяки якій можливо встановити площу проходу повітря 24...314 мм<sup>2</sup>. Через отвір площею 84 мм<sup>2</sup> буде нагнітатися 5,5 л/с.

Через отвір площею 314 мм<sup>2</sup> нагнітатиметься 20 л/с.

Об'єм води в трубах, що утворюють верхній сифон, близько 80 л з урахуванням ділянки буферного бака E22 320 л<sup>3</sup>.

Оцінимо обсяг повітря, що інjektується в буферний бак E22 за час спаду рівня до позначки 1165 (вершини оголовків активної зони). Відповідно до Табл. 3 за час  $t=92$  с буде закачано  $92 \cdot 5,5$  л  $\approx 500$  л повітря. Це якщо верхній сифон не зірветься раніше через велику кількість повітря (>15% від об'єму рідини в потоці). Це відповідає рівню в буферному баку E22 нижче рівня 750 мм, при якому злив через верхній сифон вже не можливий. Тобто злив бака ПКЗ нижче за рівень верху активної зони не можливий. Насправді злив закінчиться раніше, приблизно на позначці 1300 мм.

Отже, витікання з бака через сифон, утворений верхнім коліном, за умови вільного зливу через фланець насоса неможливе.

### 3. ВТРАТА ТЕПЛОНОСІЯ ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ ПОДАЧІ ПЕРШОГО КОНТУРУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПКЗ

Подача води в бак ПКЗ здійснюється через систему труб першого контуру охолодження, що включає теплообмінник. Загальна довжина цієї системи більше 40 м. Розглянемо процеси, що відбуваються в системі охолодження при включеній циркуляції та повільній втраті теплоносія.

На Рис. 5 наведено діаграми параметрів датчиків у характерних місцях каналу відкачування.

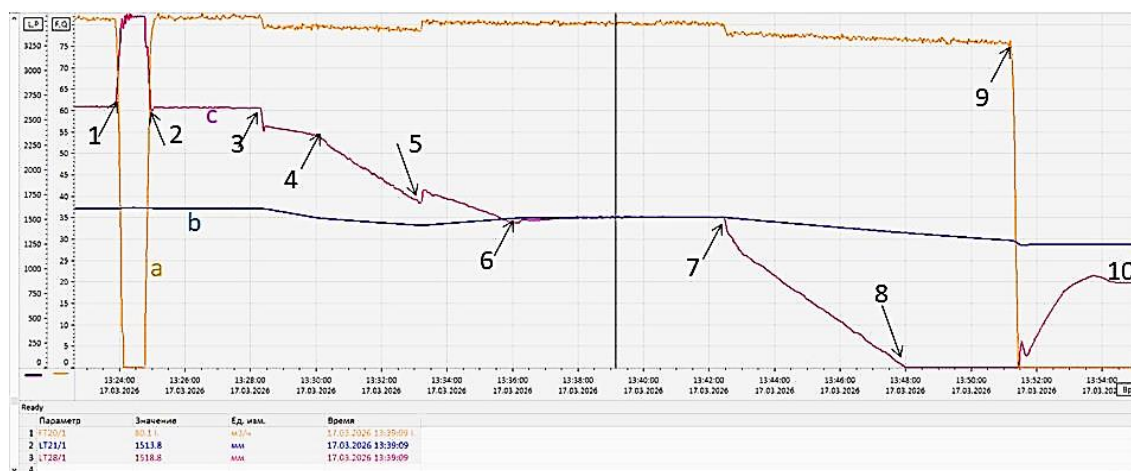


Рис. 5. Діаграма роботи системи охолодження через ПКЗ:

$a$  – витрата теплоносія насоса;  $b$  – рівень у баку ПКЗ;  $c$  – датчик тиску в буферному баку E22

1-2 – вимкнення циркуляційного насоса для калібрування датчика тиску в буферному баку E22;

2-3 – робота циркуляційного насоса в контурі без протікання;

3 – момент включення протікання;

3-4 – падіння рівня бака ПКЗ–сифон, немає підсмоктування повітря;

4-5 – спрацьовування антисифонної трубки (підсмоктування повітря);

5-6-7 – проміжна стабілізація рівнів при працюючому насосі та перекритті протікання;

7 – поновлення протікання;

7-8 – падіння рівня в буферному баку E22;

8 – датчик не показує негативний тиск;

9 – вимкнення циркуляційного насоса;

10 – стабілізація з частково порожнім баком E22.

Криві з ділянкою 1-2 показують падіння тиску на ділянці бак ПКЗ–буферний бак E22 під час роботи насоса з витратою 80 м<sup>3</sup>/год. Це падіння дорівнює 920 мм водяного стовпа, що відповідає даним розрахунку, наведеним у Табл. 2. На ділянці 2-3 система працює без втрат, та рівні теплоносія в баках не змінюються. Ділянка 3-4, коли включені втрати, але немає підсмоктування повітря (антисифонний патрубок під водою), характеризується зниженням рівня теплоносія в баку ПКЗ (1606→1514) на 92 мм. Це відповідає втраті 3,14 л/с. Додатково датчик тиску буферного бака E22 показує таке ж зниження рівня (2441→2348). У момент досягнення рівня води в баку ПКЗ (1514 мм) антисифонного патрубку (поз. 4 на Рис. 4) починається підсмоктування повітря. При цьому за час 13:30:00–13:33:09=189 с бак ПКЗ втратив 79 мм (0,42 мм/с), а буферний бак E22 – 680 мм. Тобто в буферний бак E22 на заміну води надходить повітря зі швидкістю 1,8 л/с. На ділянці 7-8 ситуація аналогічна: бак ПКЗ втрачає рівень зі швидкістю 0,44 мм/с, а в буферний бак E22 надходить повітря зі швидкістю 2,2 л/с. Отже, в

середньому буферний бак E22 осушиться за 900 с (16 хв), а рівень бака ПКЗ знизиться на 390 мм.

## ВИСНОВКИ

Експериментальний запуск першого контуру охолодження ПКЗ показав, що після довгого простою система пасивної безпеки «антисифонний пристрій» працездатна. Система зберегла параметри, забезпечуючі безпечне функціонування, але потребує більш точного налаштування перед початком дослідно-промислової експлуатації.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. A. Bykhun et al. Reactivity measurement methods and the first results of the physical start-up for the nuclear subcritical facility “Neutron Source” // *Ukr. J. Phys.* 2023, v. 68(3), p. 147-161.

2. I.M. Karnaukhov et al. Research of neutron-physical characteristics of the Subcritical Nuclear Facility “Neutron Source” of NSC KIPT during the physical start-up // *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.* 2024, 3, p. 44-59.

3. Сборки тепловыделяющие ВВР-М2: Каталогное описание У0001.04.00.000ДКО.

4. A.Yu. Zelinsky et al. NSC KIPT neutron source on the base of subcritical assembly driven with electron linear accelerator // *IPAC 2013: Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference*, 12-17 May 2013 Shanghai, China, 2013, p. 3481.

5. A.N. Vodin et al. NSC KIPT Neutron Source Status // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2013, N 6(88), p. 3-7.

6. I.E. Idel’chik. *Handbook of hydraulic resistance. Coefficients of Local Resistance and of Friction*. 1966, 526 p.

7. *Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe*. Crane Co., NY, 1982, 133 p.

## THE SIPHON EFFECT IN ENSURING A SAFE COOLANT CIRCULATION MODE IN THE SUBCRITICAL ASSEMBLY TANK OF THE SUBCRITICAL NUCLEAR FACILITY “NEUTRON SOURCE”

*O.V. Bykhun, A.O. Mytsykov, V.M. Ridozub*

The paper presents the results of experimental studies of the hydraulic coolant circulation system in the subcritical assembly tank of the subcritical nuclear facility “Neutron Source”. It is shown that the implemented engineering solutions ensure the stable functioning of the first cooling circuit system of the subcritical assembly and prevent the drying of the facility core in various emergency situations in this system, in particular in the event of a coolant circulation disruption.