

15. Vasshaug, K. Formation and dissolution of aluminium carbide in cathode blocks / K. Vasshaug et al. // *Light Metals*. – 2009. – P. 1111-1116.
16. Zoukel, A. Study of Aluminum Carbide Formation in Hall-Heroult Electrolytic Cells / A. Zoukel, P. Chartrand, G. Soucy // *Light Metals*. – 2009. – P. 1123-1128.
17. Coulombe, M.-A. Carburation Phenomenons at the Cathode Block Metal Interface / M.-A. Coulombe et al. // *Light Metals*. 2010, P. 811-816.
18. Lebeuf, M. Towards a better understanding of the carburation phenomenon / Lebeuf M. et al. // *Light Metals*, Edited by: Stephen J. Lindsay TMS (The Minerals, Metals & Materials Society). – 2011. – P. 1097-1102.
19. Novak, B. Formation of Aluminium Carbide in Hall-Heroult Electrolysis Cell Environments / B. Novak, A. P. Ratvik, Z. Wang, and T. Grande // *Light Metals*. – 2018. – P. 1215-1222.
20. Landry, J.-R. et al. Laboratory Study of the Impact of the Cathode Grade on the Formation of Deposits on the Cathode Surface in Hall-Heroult Cells / J.-R. Landry et al. // *Light Metals*. – 2018. – P. 1229-1233.
21. Пат. 2337184 Российская Федерация, МПК7 C25C 3/08. Способ получения и поддержания защитного смачиваемого покрытия на углеродистых блоках катодного устройства электролизёра для производства алюминия / Е.С. Горланов: Общество с ограниченной ответственностью «Эксперт-Ал». – № 2006142406/02; заявл. 30.11.2006; опубл. 27.10.2008 Бюлл. №30 – 11 с.

Kazymyrenko Y.O.

*Associate Professor Department of
Materials Science and Technology of
Metals Dept Admiral Makarov
National University of Shipbuilding*

Казимиренко Юлія Олексіївна

*кандидат технічних наук, доцент
кафедри матеріалознавства і технології металів
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова*

THEORETICAL JUSTIFICATION OF ENHANCEMENT OF TECHNICAL AND ECONOMIC AND OPERATIONAL INDICATORS OF ELEMENTS OF FLOATING FACILITIES FOR RADIOACTIVE CARGOES

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕМЕНТІВ ПЛАВУЧИХ СПОРУД ДЛЯ РАДІОАКТИВНИХ ВАНТАЖІВ

Abstract: The article gives a theoretical justification of technical and economic and operational indicators of modernized blocks of biological protection of floating facilities, which are intended for storage and loading of radioactive cargoes, in particular which are with final heat release. To this end, technological measures have been developed for the implementation of constructive changes and a technological comprehensive coefficient has been developed, which takes into account mass minimization, material costs, rational use of materials, complexity of work execution and complexity of structures; tense-deformed state of a tank with liquid cargo has been analyzed; according to the results of the allocation of temperature fields and air streams, compliance with the conditions of thermal safety has been determined.

Keywords: *floating facilities, radioactive cargoes, technical and economic indicators, energetic criteria, technological criteria.*

Анотація: В статті надано теоретичне обґрунтування техніко-економічних і експлуатаційних показників модернізованих блоків біологічного захисту плавучих споруд, призначених для зберігання та перевантаження радіоактивних вантажів, зокрема з остаточним тепловиділенням. Для цього розроблено технологічні заходи щодо реалізації конструктивних змін та визначено комплексний коефіцієнт технологічності, що враховує мінімізацію маси, матеріальних витрат, раціональне використання матеріалів, трудомісткість виконання робіт і складність конструкцій; проаналізовано напружено-деформований стан цистерни з рідким вантажем; за результатами розподілу температурних полів та потоків повітря визначено дотримання умовам теплової безпеки.

Ключові слова: *плавучі споруди, радіоактивні вантажі, техніко-економічні показники, енергетичні критерії, критерії технологічності.*

Постановка проблеми.

Проблема створення спеціалізованих плавучих об'єктів для радіоактивних речовин пов'язана з необхідністю перевантаження та короткочасного зберігання відсортованих радіоактивних відходів атомних електростанцій, списаного обладнання

галузових лабораторій, технічних рідин з метою подальшої переробки або захоронення. Вантажна зона, де розміщуються цистерни або баки з радіоактивними вантажами (РАВ) відокремлюються біологічним захистом, який для випадків зберігання високоактивних РАВ має вигляд заливки з радіа-

ційно стійкого бетону, обмеженого корпусом із плакованої сталі [1]. Конструктивні особливості біологічного захисту є такими, що його не можливо розділити на окремі фрагменти, тобто дослідний об'єкт вважається блоком. Товщини біологічного захисту розраховуються, виходячи з максимально небезпечних характеристик РАВ, що призводить до збільшення масогабаритних показників всього блоку, обмежуючи навантаженість плавучої споруди, зокрема через додаткове облаштування засобами примусового охолодження. Через те, що більшість плавучих баз побудовано та переобладнано під плавучі технічні споруди у 60-70 роки минулого століття і є морально застарілими проблема оновлення флоту вимагає створення нових проектів, які відповідатимуть сучасним вимогам зберігання та транспортування РАВ, максимально пристосованістю до їх енергетичних характеристик і агрегатного стану.

Виділення невирішених раніш частин загальної проблеми.

Постановці та розв'язанню задач, пов'язаних розробкою раціональної конструкції блоку біологічного захисту для плавучих споруд, присвячено роботи [2, 3], у яких за проектний критерій обрано обмеження потужності остаточного тепловиділення радіоактивних вантажів. За результатами моделювання проектної ситуації пропонується зменшити товщини бетонної заливки з 800 до 200 мм та замінити матеріал цистерн для РАВ: замість нержавіючої сталі марки 12X18H10T (ГОСТ 5632-72) використовувати вуглецеву сталь звичайної якості марки ВСт3сп (ГОСТ 5521-93). Для забезпечення необхідної радіаційної та хімічної стійкості на внутрішню поверхню цистерн рекомендується нанести захисний шар метал-скляного електродугового покриття товщиною до 2 мм [4]. Проте практична реалізація результатів задач проектування не можлива без теоретичного обґрунтування техніко-економічних та експлуатаційних показників.

Сучасна практика [5–7] вибору раціональних конструктивних рішень при проектуванні суден, елементів та конструкцій ґрунтується на розв'язанні оптимізаційних задач і розробці технологічних рекомендацій з визначенням матеріальних витрат і необхідної міцності. Для цього застосовуються моделі: економічної ефективності з вартістю життєвого циклу судна як ресурсного показника [5]; міцності з розробкою ефективних практичних рекомендацій щодо виготовлення і монтажу модулів на судні з використанням перспективних матеріалів [6]; оптимального проектування сталевих конструкцій за комплексними показниками [7]. В роботі [8] автори наводять техніко-економічне обґрунтування заміни матеріалів, де як оптимізаційний параметр обрано комплексний коефіцієнт технологічності, що враховує мінімізацію маси, матеріальних витрат, раціональне використання матеріалів, трудомісткість виконання робіт і складність конструкцій. Проте підвищення експлуатаційних вимог до блоків біологічного захисту як великовантажних елементів плавучих

споруд вимагає додаткового розв'язання функціональних задач.

Мета роботи – надати теоретичне обґрунтування техніко-економічних і експлуатаційних показників блоків біологічного захисту на основі введення комплексних показників щодо вибору раціонального конструктивного рішення та розв'язання задач технологічності, міцності і теплової безпеки.

Для цього необхідно:

1) розробити технологічні заходи щодо реалізації конструктивних змін блока біологічного захисту;

2) виконати аналіз напружено-деформованого стану цистерни при заповненні її рідкими РАВ;

3) визначити вплив зменшення товщини бетонного шару на циркуляцію потоків повітря та розподіл температурних полів з метою дотримання умов теплової безпеки.

Виклад основного матеріалу.

Характеристика блоку біологічного захисту і методи дослідження.

Проектне дослідження модернізованого блоку біологічного захисту виконано на прикладі плавбази, яку у зарубіжній практиці застосовано для тривалого зберігання високоактивних відходів, зокрема рідких РАВ, відпрацьованого ядерного палива, технологічного устаткування [1]. Це є несамохідне судно з наступними розмірностями: довжина $L = 5,8$ м; ширина $B = 11,5$ м; з висота борта $h = 6$ м), де радіоактивний вантаж розміщується у двох герметично закритих сталевих кришкою товщиною 300 мм циліндричних цистернах діаметром 3,6 м і висотою 3,4 м, що виготовлені з вуглецевої сталі ВСт3 (ГОСТ 5521-93) та розташовані в середині блоку біологічного захисту. На внутрішню поверхню цистерн нанесено шар товщиною 2 мм метал-скляного електродугового покриття на основі суцільнотягнутого дроту марки Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75); внутрішня поверхня кришки цистерни облицьована шаром склоалюмінієвого композиційного матеріалу, виготовленого за технологією порошкової металургії [9]. На відміну від судна-прототипу (рис.1) за результатами розробок автора, викладених в роботах [2, 3] зменшено товщину бетонного шару до 200 мм. Вирішення поставлених у статті завдань спрямовано на підвищення на відміну від прототипу наступних техніко-економічних і експлуатаційних показників блоку біологічного захисту: масогабаритних показників і пов'язаних з ними матеріальними витратами та собівартістю; пристосованістю до вантажних операцій; розширення асортименту вантажів і кількісних показників вантажообігу; можливість зберігання РАВ у твердому та рідкому агрегатному стані; полегшення технологічного обслуговування; можливість зберігання РАВ з певним остаточним тепловиділенням без обладнання плавучих споруд додатковими засобами примусового охолодження.

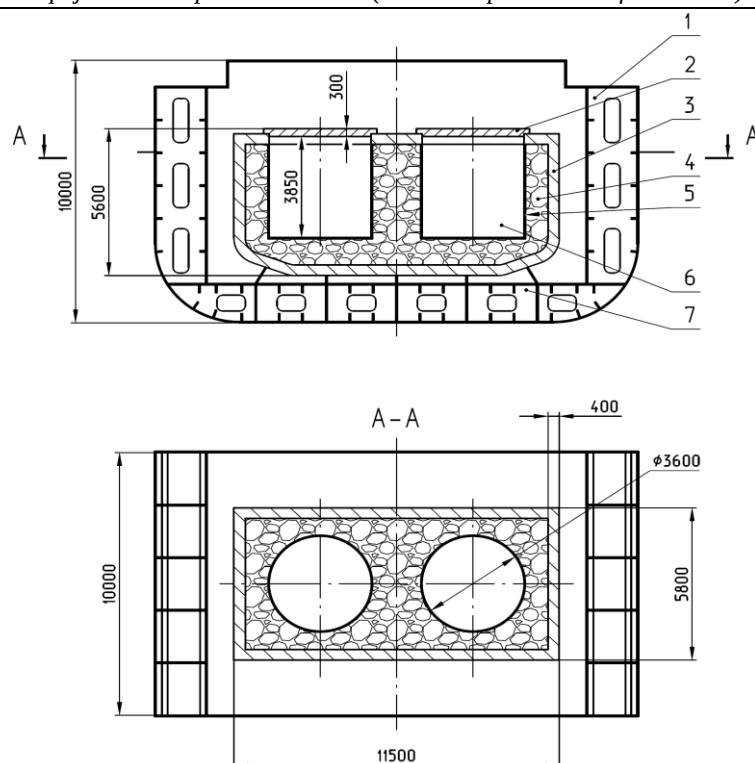


Рис. 1. Конструктивна схема вантажної зони плавучої споруди-прототипу:

1 – подвійний борт; 2 – кришка; 3 – зовнішній корпус;
4 – бетонна заливка; 5 – цистерни для РАВ; 6 – РАВ; 7 – подвійне дно

За методи досліджень в роботі обрано: систематехнічний підхід з введенням комплексного коефіцієнта технологічності [10], проектне дослідження [11], яке ґрунтується на аналізі даних розрахунково-графічної моделі з висновками та пропозиціями щодо подальших розробок, аналітично-графічне оцінювання напружно-

деформованого стану для ідеально циліндричної оболонки [12], числове моделювання з використанням методу скінчених об'ємів [13]. Поставлені задачі розв'язано для геометричної моделі одиної цистерни з багатошаровою теплопровідною стінкою (рис. 2).

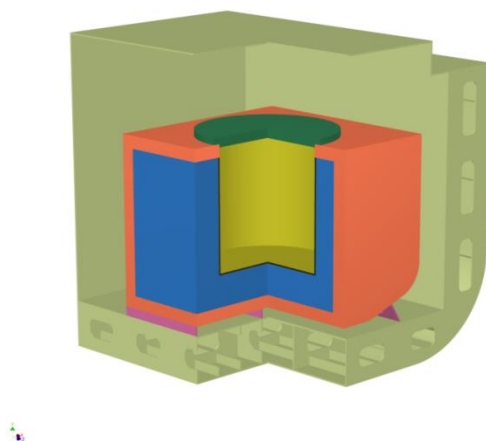


Рис. 2. Геометрична модель одиної цистерни з багатошаровою теплопровідною стінкою

Розробка і оцінка ефективності технологічних заходів щодо реалізації конструктивних змін здійснюється за комплексним коефіцієнтом технологічності, який за результатами побудови номограм [8] складає 6,0...7,0; його складові показники проаналізовано в табл. 1. Результати показали, що зменшення товщини бетонного шару з 800 до 200

мм сприяє скороченню на 30 % матеріалоємності, проте ускладнено технологічні показники: збільшення на 20 % трудомісткості формування бетонного шару циліндричної форми пов'язано з влаштуванням знімної опалубки навколо цистерни, яка складається зі сталевих листів товщиною 5...10 мм, що з'єднуються між собою за допомогою бов-

тів, або сіток з розміром комірки 5×5 мм або 8×8 мм, яка натягується уздовж усієї обмежувальної поверхні, залишаючи зазор у 5...7 мм для термічного розширення. Вибір марки бетонної суміші ґрунтується на відповідності вимогам радіаційної стійкості, морозостійкості, водонепроникненості і

терміну служби не менш ніж 50 років: для цього рекомендовано бетони марки М500, М700 (клас на стискання В50), F300, W8 [14], на який додатково наноситься вогнезахисне покриття товщиною шару 1 мм, для чого рекомендується застосовувати наповнені силікатами Hf, Sc, Yb фарби [15].

Таблиця 1

Комплексні показники технологічності блоку біологічного захисту

Показники	Критерії оцінювання	Корегування
Матеріаломісткості	$K_m = \frac{M_i}{M_{ni}}$ – відношення чистої маси конструкції M_i до номінального значення маси M_{ni} i -го матеріалу для виготовлення конструкцій	Скорочення на 30 % матеріалоємності; зниження удвічі маси бетонної заливки (при щільності бетону 2298 кг/м ³ [14]) та маси блоку
Складності конструкції	$K_{cl} = \frac{n^{\delta}}{n^{nb}} \cdot K_c$ де K_c – коефіцієнт, що враховує габарити дослідної конструкції; n^{δ} – кількість складових елементів конструкції; n^{nb} – кількість складових елементів конструкції конкурентного аналога (традиційного виду)	У порівнянні з прототипом не змінено
Технологічності конструкції за трудомісткістю	$K_T = 1 - \frac{T_i}{T_a}$ де T_i – час підготовчої обробки перед монтажем для дослідної конструкції; T_a – час підготовчої обробки перед монтажем для конкурентної конструкції аналога (традиційний вид).	На 20 % ускладнено трудомісткість робіт щодо формування бетонної заливки, на 15 % – за рахунок нанесення електродугових покриттів замість лакофарбових

Заміна лакофарбового покриття, який із середини було захищено цистерну, виготовлену із нержавіючої сталі, на нове метал-скляне електродугове покриття, пов'язано з 15 % збільшенням коефіцієнту трудомісткості, що викликано змінами у технологічному процесі, який включає в себе виготовлення вертикальних цистерн для РАВ як невід'ємної частини блоку, де захист внутрішніх поверхонь забезпечує надійну експлуатацію та можливість зберігання на плавучих спорудах широкого асортименту вантажів. Перед нанесенням метал-скляних покриттів здійснюється струминно-абразивна обробка внутрішньої поверхні цистерни, після якої не повинно залишатись заусенців, залишкового флюса, раковин, тріщин, зварювальних бризок. Для уникнення утворення конденсаційного шару вологи, який призводить до зниження міцності зчеплення покриття на напилювальною поверхнею, необхідно підтримувати температуру в цеху на рівні кімнатної (18±2 °С). Якщо нанесення покриття відбувається на судні (у випадку ремонту) або у приміщенні з меншою температурою, достатньо попереднього нагрівання поверхні до 100...120 °С. Як джерело нагрівання

може бути використано струміль продуктів згоряння електродугового апарату без подачі напилювального матеріалу. При виготовленні цистерни покриття наноситься виключно на внутрішню бокову поверхню, на її дно – після з'єднання з фундаментною плитою. Для напилення внутрішніх поверхонь цистерни як тіл обертання застосовується обертач. Товщина шару за один прохід становить 0,10...0,25 мм, тобто для напилення $\delta = 1,5...2$ мм процес здійснюється у декілька проходів. Контроль товщини шару покриття вимірюється у трьох перетинах (по три виміру у кожному перетині). Після закінчення процесу напилення поверхня очищується за допомогою металевої щітки.

Проведені за геометричними розмірами моделей (рис. 1 і 2) оціночні розрахунки довели зниження маси бетонної заливки (при щільності бетону 2298 кг/м³ [14]) більш ніж удвічі. Враховуючи те, що масу блока у порівнянні з існуючими варіантами знижено, у роботі не виконуються розрахунки місцевої міцності плавучої технічної бази.

Аналітично-графічне оцінювання напружено-деформованого стану удосконаленої цистерни з РАВ. Реалізація розроблених конструктивних і те-

хнологічних заходів для випадків зберігання на плавучих спорудах рідких РАВ пов'язана з вирішенням додаткових завдань щодо аналізу напружено-деформованого стану бака по поверхні бетон-сталь-покриття. Заміна матеріалу бака (цистерни) при зберіганні товщини його стінки та зменшення до 200 мм товщини бетонної заливки, зокрема в районі дна цистерни (рис. 2) у випадках зберігання рідких радіоактивних вантажів може викликати деформації стінки в зоні нижнього вузла. Аналітично-графічне оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) стінка-дно, виконано

на прикладі ідеальної циліндричної оболонки, всієї симетрично навантаженої гідростатичним тиском без урахування фізичної і геометричної нелінійності матеріалу конструкції [10]. Розрахункова схема (рис. 3, а) враховує радіальне переміщення стінки W_x ; вертикальне переміщення днища W_y ; тиск рідини P_x на висоті x ; тиск рідини P на дно, тобто при $x = 0$; реакцію опори $q(y)$, а також M_x , M_y – згинальні моменти та Q_x , Q_y – поперечні сили у стінки (за координатою x) та днищі (за координатою y).

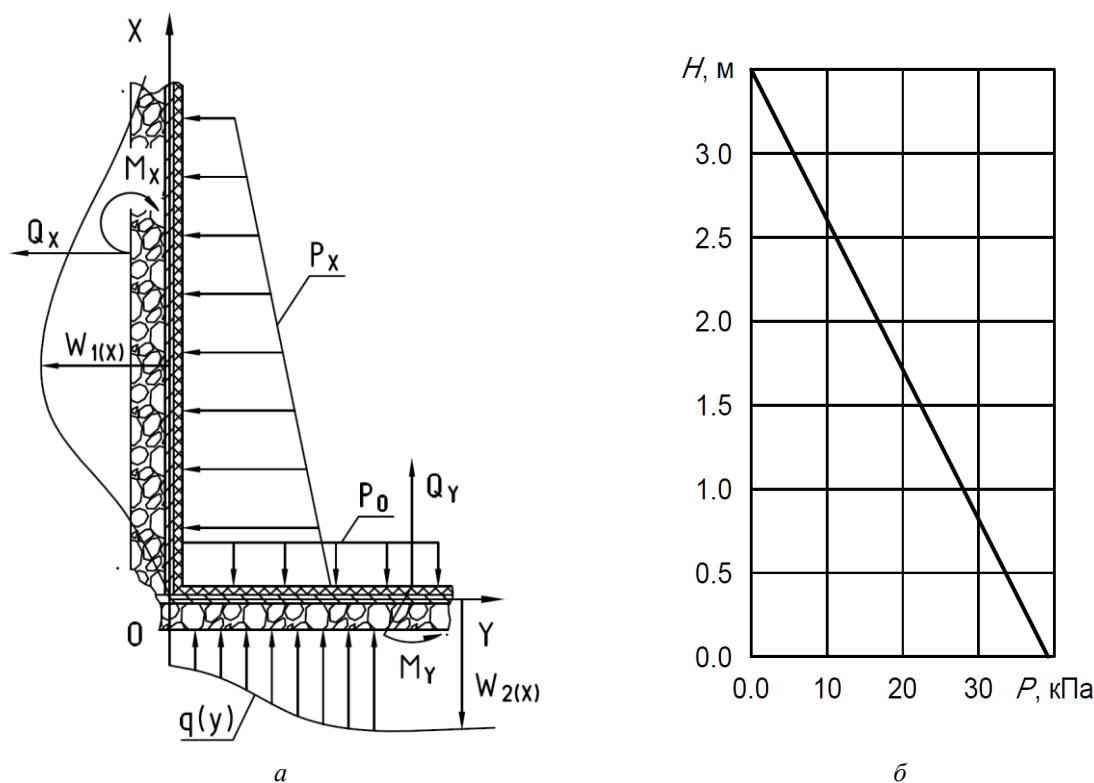


Рис. 3. Результати аналітично-графічного оцінювання НДС стінка-дно:
а – розрахункова схема; б – напруження в стінці бака

Узагальнене диференціальне рівняння [10] замкненої кругової циліндричної оболонки, яка знаходиться під дією вісесиметричного гідростатич-

ного навантаження, з урахуванням багат шарової стінки буде мати вигляд

$$D \frac{d^4 \omega}{dx^4} + \frac{(E_{бет} \cdot \delta_{бет} + E_{ст} \cdot \delta_{ст} + E_{пок} \cdot \delta_{пок})}{r^2} \omega = P(x), \quad (1)$$

де D – циліндрична жорсткість; $P(x)$ – інтенсивність зовнішнього навантаження; x – координата висоти прогину; r – радіус циліндричного бака; $E_{бет}$, $E_{ст}$, $E_{пок}$ – модуль пружності відповідно бетону, сталі, метал-скляного покриття; $\delta_{бет}$, $\delta_{ст}$, $\delta_{пок}$ – товщина шару відповідно бетону, сталі, метал-скляного покриття; ω – значення прогину у радіальному напрямку, який визначається як

$$\omega = -\frac{\rho r^2}{E_{екв} \delta_{екв}} X, \quad (2)$$

де ρ – густина рідини; $\delta_{екв}$ – еквівалентна товщина стінки, визначається як $\delta_{екв} = \delta_{бет} + \delta_{ст} + \delta_{пок}$; $E_{екв}$ – еквівалентний модуль пружності багат шарової стінки бака (ви-

значено за середніми значеннями); X – координата, еквівалентна висоті стінки.

При постановці задачі висунуто припущення, що вільна поверхня рідини є плоскою. Крім того, не враховано рух рідини внаслідок качки. Сили, позначені у розрахунковій схемі, прикладаються одночасно; еквівалентну стінку слід вважати жорсткою. Задачу розв'язано як вісесиметричну, у лінійній постановці за допомогою методу скінчених елементів. Для завдання гідростатичного навантаження обрано наступні параметри: висота завантаження – 3,5 м; радіус циліндричного бака – 1,8 м; густина рідини – 1140 кг/м³; значення гравітаційної сталої – 8,91 кг/(м·с); гідростатичне навантаження – 40 кПа. Задачу розв'язано методом скінчених елементів [13] (рис. 3б); результати наведені

у вигляді розподілу напружень по висоті стінки. Розрахунки за формулою (2) прогину довели жорсткість циліндричної стінки через бетонний шар. Одержані результати показали лінійність побудованої моделі; розрахункова похибка пов'язана з приблизними значеннями еквівалентних модулів пружності.

Вплив зменшення товщини бетону на тепловий стан вантажної зони проаналізовано на прикладі моделювання теплових процесів для конструкції блоку з вкладеними цистернами (рис. 3), де за мету досліджень поставлено визначення температурних полів та безпечної циркуляції потоків повітря між цистернами та корпусом блока біологічного захисту.

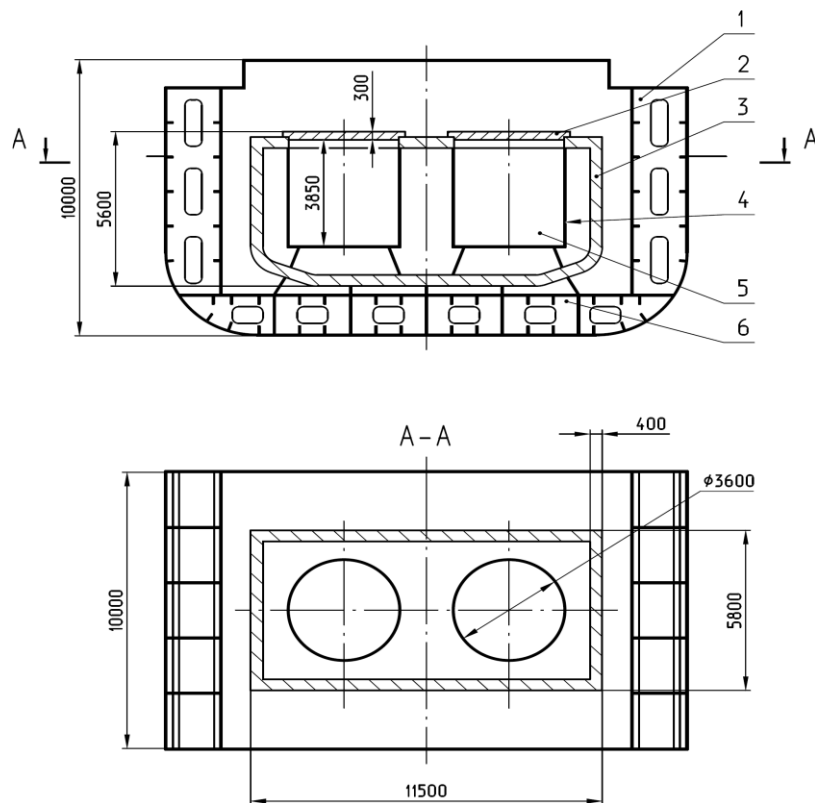


Рис. 3. Розрахункова схема для моделювання процесів теплообміну у вантажній зоні плавучої споруди (варіант з вкладеними цистернами):

1 – подвійний борт; 2 – кришка; 3 – зовнішній корпус;
4 – вкладені цистерни для РАВ; 5 – вантаж; 6 – подвійне дно

Розрахунки показали, що зменшення товщини бетонного шару до 200 мм сприятиме більш інтенсивній циркуляції повітря між цистернами з РАВ та корпусом блока біологічного захисту. За результатами числового моделювання визначено неоднорідність розподілу полів температур (табл. 2) по об'єму вантажної зони плавучої споруди: най-

більш розігрітою є частина моделі (рис. 2), наближена до кришки, де температура РАВ складає 337...690 К; у просторі подвійного дна температура значно нижче – 290...330 К, що пояснюється інтенсивним зніманням теплоти за рахунок конвективного теплообміну.

Таблиця 2

Середні значення температур у вантажній зоні

Температури у вантажній зоні	Потужність тепловиділення, Q		
	2 кВт	8 кВт	20 кВт
T вантажу, К	337	450	690
T стінки цистерни, К	320	410	570
T повітря під кришкою, К	350	470	690
T зовні кришки, К	330	350	450
T повітря всередині блока	325	390	450
T _{зов} зовні корпусу, К	315	350	410...370
T подвійного борту, К	310	310	330
T подвійного дна, К	290	290	290...330

Внаслідок екзотермічних реакцій у повітрі можуть виникати скупчення шкідливих та небезпечних речовин, що збільшує ризик виникнення аварійних ситуацій. Проте така конструкція сприятиме відведенню тепла завдяки потокам повітря,

які омивають стінки цистерни зі швидкістю 0,23...0,38 м/с та циркулюють зі швидкістю 0,1...0,2 м/с у просторі між зовнішнім корпусом блоку та цистерною, як це доведено у табл. 3.

Таблиця 3

Середні значення швидкостей потоків повітря у вантажній зоні

Швидкість повітря у вантажній зоні, м/с	Потужність тепловиділення, Q		
	2 кВт	8 кВт	20 кВт
V біля стінок цистерн	0,082	0,23	0,38
V під кришкою	0,16	0,24	0,58
V уздовж корпусу блоку	0,24	0,1	0,2
V біля подвійного борту	0,082	0,11	0,14
V у подвійного дна	0,05	0,05	0,05

Одержані результати показали можливість безпечного зберігання у відповідності з Правилами МАГАТЕ РАВ з остаточним тепловиділенням до 8 кВт ($Q_{\text{пвт}} = 230 \text{ кВт/м}^3$) без додаткового улаштування засобами примусового охолодження.

Висновки

1. За результатами досліджень комплексних показників технологічності блока біологічного захисту надано теоретичне обґрунтування для розробки технологічних заходів, які полягають у заміні матеріалу вертикальної цистерни з нержавіючої сталі марки 12X18H10T на вуглецеву сталь марки ВСт3 з нанесеним на внутрішню поверхню метал-скляним електродуговим покриттям, зменшенні товщини бетонного шару з 800 до 200 мм, що дає змогу знизити масу блока більше ніж у два рази та зберігати вантажі підвищеної щільності, зокрема рідкі.

2. Ефективність зменшення товщини бетонного шару підтверджено результатами теоретичних досліджень напружено-деформованого стану стінки цистерни (з метал-скляним покриттям) – дно, аналітично-графічне оцінювання якого з побудовою епюр прогину та визначенням напружень в стінці під дією віссиметричного гідростатичного навантаження до 40 кПа з урахуванням багатшарової стінки показало можливість зберігання рідких РАВ з густиною до 1140 кг/м³.

3. Доведено можливість зберігання на плавучих спорудах без обладнання засобами примусового охолодження РАВ з питомим остаточним тепловиділенням на рівні 230 кВт/м³: результати розрахунків щодо розподілу температурних полів і потоків повітря у вантажній підтвердили ефективність зменшення товщини бетонного шару, що позитивно впливає на відведення тепла з розігрітих ділянок потоками циркулюючого повітря.

Одержані наукові результати спрямовані на підвищення техніко-економічних і експлуатаційних показників елементів біологічного захисту плавучих споруд, такі як зниження масогабаритних показників, розширення асортименту вантажів за рахунок можливостей зберігання рідких РАВ та речовин з остаточним тепловиділенням. Подальші дослідження пов'язані розробкою організаційно-технічних заходів і прогнозуванням динаміки економічної ефективності.

Література

1. Анитропов, В. А. Конструктивные отличия судов АТО и организационно-технические системы их утилизации / В. А. Анитропов, Н. И. Александров, А. Я. Розинов // Вопросы утилизации АПЛ : бюл. – 2005. – № 2/6. – С. 32.
2. Казимиренко, Ю. А. Решение задач теплообмена при перевозке и хранении радиоактивных грузов на плавучих сооружениях / Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – Baki : Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, 2016. – № 2. – С. 20–27
3. Казимиренко, Ю. А. Влияние энергетических параметров радиоактивных грузов на процессы теплопереноса и прочность композитных конструкций плавучих сооружений / Ю. А. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2016. – № 4 (8), vol. 7. – P. 58–63.
4. Казимиренко, Ю. О. Коррозийный захист сталевих цистерн для зберігання рідких радіоактивних речовин на плавучих спорудах / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2016. – № 7 (11), vol. 2. – P. 16–21.
5. Некрасов, В. А. Определение оптимальных характеристик быстроходного пассажирского судна / В. А. Некрасов, Нгуен Гуй Хоанг // Вісник НУК імені адмірала Макарова (електрон. вид.). – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 23–29.
6. Конструювання CNG-модуля для транспортування природного газу суднами-контейнеровозами / Є. І. Крижанівський, В. І. Артим, О. М. Мандрик, М. М. Савицький // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 1 (17). – С. 28–34.
7. Гинзбург, А. В. Постановка задачи оптимального проектирования стальных конструкций / А. В. Гинзбург, А. А. Василькин // Вестник МГСУ. – 2014. – № 6/20. – С. 52–62.
8. Казимиренко, Ю. А. Оценка технологичности композитных конструкций судов и плавучих сооружений на основе системотехнического подхода / Ю. А. Казимиренко, В. В. Савочкина // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2015. – № 4/1 (24). – С. 65–68.
9. Казимиренко, Ю. А. Закономерности формирования металлостеклянных материалов и по-

крытий с повышенными рентгенозащитными свойствами / Ю. А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2013. – № 6/2 (14). – С. 4–8.

10. Павлов, И. Д. Системотехническая оценка комплексной технологичности проектных решений строительных конструкций бионического типа [Текст] / И. Д. Павлов, М. А. Каплуновская // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. – Днепропетровск: Приднепровская гос. Академия строительства и архитектуры, 2009, Вып. 50. – С. 232–236.

11. Волков, А. А. Развитие методологии поиска проектного решения при проектировании строительных металлоконструкций / А. А. Волков, А. А. Василькин // Вестник МГСУ. – 2014. – № 9. – С. 123–127.

12. Тарасенко, А. А. Напряженно-деформированное состояние вертикальных стальных резервуаров при ремонтных работах / А. А. Тарасенко. – М. : Недра, 1999. – 271 с.

13. Смирнов, Е. М. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии / Е. М. Смирнов, Д. К. Зайцев // Научно-технические ведомости СПбПУ. – 2004. – № 2. – С. 2–22.

14. Пичугин, А. Д. О развитии серобетонного судостроения / А. Д. Пичугин // Вестн. АГТУ. – Астрахань, 2007. – № 2 (37). – С. 114–117.

15. Яковчук, Р. С. Исследование огнезащитной эффективности наполненных кремнийорганических покрытий для бетона / Р. С. Яковчук, Р. Б. Веселивский // ВІСТ. – 2014. – Vol. 36, Iss. 4. – P. 59–64.

Azarov S.I.

*Doctor of technical sciences, Senior researcher
Leading researcher, Institute for Nuclear Research
National Academy of Sciences of Ukraine*

Sydorenko V.L.

*Candidate of technical sciences, Associate professor
Professor of the Department of Fire Prevention and Life Safety of Citizens
of the population, Institute of Public Administration in the Sphere of Civil Protection*

Zadunaj O.S.

*Head of center, State Research Institute for Special Telecommunication
and Information Protection*

Азаров Сергій Іванович

*доктор технічних наук, старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник, Інститут ядерних досліджень НАН України*

Сидоренко Володимир Леонідович

*кандидат технічних наук, доцент
професор кафедри профілактики пожеж та безпеки життєдіяльності
населення, Інститут державного управління у сфері цивільного захисту*

Задунай Олексій Сергійович

*начальник центру, Державний науково-дослідний інститут спецв'язку
та захисту інформації*

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES IN OPERATION OF STORAGE FACILITIES FOR SPENT NUCLEAR FUEL

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОКРОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Abstract. Forecast calculations and analysis of radiation effects on environmental components during the operation of a wet storage of spent nuclear fuel have been carried out. It is shown that in the normal operation of the storage facility, the radiation effects on the environment are insignificant. However, in case of accidents, the severity of the environmental consequences will be significant for the environment and preventive measures should be applied.

Keywords: ISF, principles and criteria of ecological safety, spent nuclear fuel, nuclear fuel storage facility.

Анотація. Проведено прогностичні розрахунки й аналіз радіаційних впливів на компоненти навколишнього середовища в процесі експлуатації мокрого сховища відпрацьованого ядерного палива. Показано, що в умовах нормальної експлуатації сховища радіаційні впливи на навколишнє середовище несуттєві. Проте у випадку виникнення аварій тяжкість екологічних наслідків для довкілля буде суттєва, тому необхідно застосовувати превентивні заходи захисту.

Ключові слова: СВЯП, принципи і критерії безпеки, відпрацьоване ядерне паливо, сховище ядерного палива.