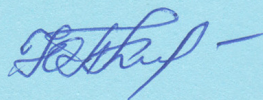


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

КАЗИМИРЕНКО ЮЛІЯ ОЛЕКСІЇВНА

УДК 629.56:539.388:666.1.037.3:621.793



**НАУКОВІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ І ПІДВИЩЕННЯ
ЗАХИСТУ МЕТАЛ-СКЛЯНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ЕЛЕМЕНТІВ
СУДЕН ДЛЯ РАДІОАКТИВНИХ ВАНТАЖІВ**

Спеціальності

05.08.03 — конструювання та будування суден

05.17.11 — технологія тугоплавких неметалічних матеріалів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Миколаїв – 2019

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Дубовий Олександр Миколайович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова МОН України,
м. Миколаїв, завідувач кафедри матеріалознавства
і технології металів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Кравцов Віктор Іванович
Національний авіаційний університет
МОН України, м. Київ,
професор кафедри машинознавства

доктор технічних наук, доцент
Луцюк Ірина Володимирівна
Національний університет «Львівська політехніка»
МОН України, м. Львів
професор кафедри хімічної технології силікатів

доктор технічних наук, професор
Мандрик Олег Миколайович
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу МОН України,
м. Івано-Франківськ, перший проректор

Захист відбудеться 11 вересня 2019 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр-т Героїв України, 9, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: м. Миколаїв, пр-т Героїв України, 9, ауд. 650 та на сайті:
<http://www.nuos.edu.ua/zdobuvachi-2019-roku-d-38-060-02>

Автореферат розіслано 03 травня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02
д-р техн. наук, професор



В. В. Зайцев

Актуальність теми. Рішення проблеми транспортування і тимчасового зберігання радіоактивних вантажів (РАВ) у світовій практиці реалізується шляхом створення спеціалізованих суден, плавучих баз і сховищ. Підвищення їх техніко-економічних та експлуатаційних показників залежить від впровадження нових проектних підходів, що враховують енергетичні характеристики вантажів, включають у себе розвиток методів оцінювання технічного стану і ґрунтуються на теоретичних засадах підвищення захисту функціональних елементів від шкідливої дії РАВ, що не можливе без створення нових матеріалів та покриттів, хімічний склад, структура і властивості яких забезпечать певні механізми послаблення іонізуючих випромінювань та їх спроможність працювати в умовах хімічно активних речовин, підвищених температур і термоциклічних навантажень при зберіганні радіоактивних вантажів з остаточним тепловиділенням. Сучасний досвід поводження з радіоактивними речовинами ґрунтується на застосуванні для виготовлення екрануючих елементів матеріалів з ультра- та полідисперсною структурою, компонентами яких можуть бути речовини з різною поглинаючою здатністю, зокрема скло з металами, технологічні передумови з'єднання яких передбачають застосування високотемпературних технологій з ретельним підбором компонентів за функціональними властивостями, серед яких особлива увага надається дисперсним системам у вигляді скляних порошків і мікросфер.

Суть науково-технічної проблеми полягає у розробці принципово нового наукового підходу до проектування елементів суден і плавучих споруд для радіоактивних вантажів, в основу якого покладено дотримання умов теплової безпеки та теорію захисту конструкцій на основі фізико-хімічних процесів створення нових композицій з полі- та ультрадисперсною структурою шляхом високотемпературних технологій поєднання скляних мікросфер і порошків з металами. В основу дисертаційного дослідження покладено *наукову гіпотезу* про підвищення ефективності біологічного захисту на суднах і плавучих спорудах шляхом проектування багат шарових елементів, де максимальна енергія іонізуючих і теплових випромінювань РАВ послаблюється захисним шаром, в основу формування якого покладений механізм багаторазового внутрішнього відбивання потоку у середовище поглинання через поєднання металу зі склом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках діючих загальноцільових програм: економічної програми розвитку кораблебудування на період до 2035 р. (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 06.05.2009 р.), програми 2007–2017 рр. поводження з радіоактивними відходами (Закон України від 17.09.2008 р. №516-VI); у відповідності з Законом України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» №3715-VI від 08.09.2011 р. (редакція від 05.12.2012 р.), ст. 4 «Стратегічні пріоритетні напрями інноваційної діяльності на 2011–2021 рр.», п. 2 «Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- та суднобудування, озброєння і військової техніки»; планами науково-дослідницьких робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) за держбюджетними темами: №1555 «Дослідження впливу термодеоформаційних, електрофізичних та газодинамічних процесів на формування структури і властивостей

порошкових матеріалів і напилених покриттів» (ДР №0105Г001766) — виконавець; №1674 «Теоретичні і технологічні основи створення комплексно-захисних матеріалів і покриттів для засобів зберігання та транспортування небезпечних речовин» (ДР №0108U001169) — відповідальний виконавець; №1852 «Наукові основи формування наноструктурних елементів у пластично деформованих металах та прогнозування фізико-механічних властивостей наноструктурних металокомпозитів» (ДР №0112U000350) — виконавець; №1988 «Наукові основи підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей напилених покриттів із металів і сплавів формуванням наноструктурних елементів термічною обробкою та електроімпульсною дією» (ДР №0115U00299) — виконавець; №1991 «Розвиток проектів та програм інтеграції української технічної освіти у світовий освітній процес» (ДР №0115U000301) — виконавець.

Об’єкт досліджень — процеси підвищення комплексного захисту елементів суден для РАВ, вибору раціональних конструктивних рішень, теплообміну у вантажній зоні плавучих споруд, міцності та пошкоджуваності конструкцій; фізико-хімічні процеси створення нових метал-скляних матеріалів і покриттів, процеси спікання скляних мікросфер із порошками металів, кристалізації скляних порошків і мікросфер при спіканні та електродуговому напиленні, їх впливу на рентгенозахисні властивості та радіаційну стійкість матеріалів і покриттів, термомеханічні процеси у опромінених метал-скляних покриттях.

Предмет досліджень — закономірності впливу енергетичних характеристик РАВ на проектні параметри елементів суден та плавучих споруд, механізми послаблення іонізуючих випромінювань структурними елементами метал-скляних матеріалів і покриттів.

Мета роботи полягає у створенні наукових засад проектування елементів біологічного захисту суден і плавучих споруд для радіоактивних вантажів, які спрямовані на підвищення техніко-експлуатаційних показників та ґрунтуються на принципах послаблення випромінювань, теплової безпеки та теорії їх захисту з розробкою фізико-хімічних основ створення нових матеріалів і покриттів з полі- та ультрадисперсною структурою шляхом поєднання скляних мікросфер і порошків з металами методами спікання та електродугового напилення. Для досягнення поставленої мети визначено наступні науково-технічні завдання:

1) проведення аналітичного огляду сучасного наукового досвіду з проблематики проектування і підвищення захисту елементів суден та плавучих споруд для радіоактивних вантажів; теоретичних і технологічних тенденцій створення поліфункціональних матеріалів для суднобудування на основі скла;

2) створення теоретичних засад підвищення комплексного захисту елементів суден від шкідливої дії РАВ з розробленням нових матеріалів і покриттів, структура та властивості яких забезпечать зниження інтенсивності потоків γ - і рентгенівських випромінювань, міцність під дією теплових ефектів та надійну експлуатацію в умовах судна;

3) розроблення фізико-хімічних основ поєднання в одній композиції скляних і металевих компонентів методами спікання та електродугового напилення з встановленням закономірностей впливу аморфного і кристалічного стану скла на структуру та експлуатаційні властивості композиційних матеріалів і покриттів;

4) розроблення нових науково-методичних засад оцінювання технічного стану захисних суднових конструкцій, що ґрунтуються на принципах систематизації та оновлення інформації щодо пошкоджуваності матеріалів в умовах опромінення, термоциклічних навантажень, хімічно активних середовищ і взаємозв'язку проектних, технологічних та експлуатаційних факторів;

5) вирішення конструкторських завдань щодо удосконалення конструкції модуля біологічного захисту за допомогою розроблених матеріалів і покриттів із розв'язанням задач міцності в екстремальних умовах експлуатації;

6) розроблення нових теоретичних підходів до проектування модулів і блоків біологічного захисту з вибором конструктивно-компонувальних рішень на основі експлуатаційних критеріїв та обмежень за енергетичними характеристиками РАВ;

7) розроблення ремонтних заходів деталей запірної арматури вантажних систем плавучих споруд для рідких РАВ, технологічних рекомендацій щодо виготовлення конструкцій за участю нових матеріалів та покриттів з визначенням техніко-економічних показників і розв'язанням оптимізаційних задач за технологічними та вартісними критеріями;

8) визначення інноваційних перспектив розвитку проектів будування і модернізації суден, визначення економічної ефективності наукових розробок та їх апробація у проектних, виробничих і наукових організаціях та навчальному процесі у вищому навчальному закладі.

Методи досліджень. Для вирішення завдань щодо конструювання та проектування блоків і модулів біологічного захисту використано методи: оптимального проектування на основі моделей функціонування судна, балансу мас і балансу площ, проектування інтелектуальних систем для управління процесами завантаженості судна, скінчених об'ємів і комп'ютерної алгебри для числового моделювання процесів теплообміну та розв'язання задач міцності, системотехнічний підхід і принципи максимальної експлуатаційної ефективності судна. Для розробки науково-методичних засад оцінювання технічного стану використано методи системного аналізу, класичні технології проектування баз даних; інформацію щодо пошкоджуваності матеріалів одержано в результаті мікроструктурних досліджень, механічних, корозійних та термоциклічних випробувань за стандартними методиками; обробку експериментальних результатів здійснено з використанням методів математичної статистики. Закономірності структуроутворення матеріалів і покриттів виявлено за допомогою методів оптичної (мікроскопи ММР-2Р і БИОЛАМ-И) та електронної мікроскопії (РЭММА-102-02), рентгеноструктурного (ДРОН-3, ДРОН-4) і мікрорентгеноспектрального (РЭММА-102-02) аналізу, підґрунтям для чого є положення хімії твердого тіла та склоподібного стану, що також застосовано для досліджень дифузійних процесів на межі підкладка–покриття. Фізико-математичні моделі, що описують термомеханічні процеси при опроміненні, одержано розв'язанням задач мікромеханіки та термопружності.

Інформаційну базу досліджень становлять Регістр судноплавства України, норми МАГАТЕ, нормативні документи Міжнародних конвенцій, законодавча база України; наукові праці вітчизняних і зарубіжних вчених з констру-

ювання, проектування і будування суден, розробки новітніх технологій захисту конструкцій за участю радіаційно стійких матеріалів, виготовлених на основі скла, технологій спікання скляних порошків, виготовлення скляних мікросфер; періодичні видання, інтернет-ресурси.

Обґрунтованість, достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректною постановкою завдань досліджень, застосуванням стандартних методів, математико-статистичною обробкою отриманих даних з прийнятою точністю; узгодженістю результатів моделювання теплового стану у вантажній зоні з розв'язанням задач у спряженій і плоскій постановці та результатами числових експериментів когнітивного моделювання, збіганням результатів моделювання руйнування панелей модуля біологічного захисту при короткочасному температурному навантаженні з результатами досліджень термостійкості; порівняльними дослідженнями спікання скляних мікросфер крім порошку Al з іншими металевими порошками та застосуванням в технологіях електродугового напилення крім скляних, керамічних мікросфер; узгодженістю результатів досліджень експлуатаційних властивостей розроблених матеріалів і покриттів з їх відомими сучасними аналогами. Обґрунтованість наукових положень полягає у ретельному аналізі наукових праць у предметній області, збіганні отриманих результатів з роботами інших авторів.

***Наукова новизна отриманих результатів:
за спеціальністю 05.08.03***

Вперше:

– науково обґрунтовано та запропоновано новий підхід до проектування елементів плавучих споруд, який пов'язує енергетичні параметри радіоактивних вантажів з геометричними розмірними блоками, товщинами і теплопровідністю кожного з шарів біологічного захисту і дає змогу, отримуючи інформацію про розподіл температур та циркуляцію повітря, встановлювати проектні обмеження щодо потужності остаточного тепловиділення РАВ у межах 2...20 кВт та обирати оптимальні конструктивно-компонувальні рішення на основі обмежень за потужністю остаточного тепловиділення [7, 8];

– розроблено концептуальні положення підвищення комплексного захисту блоків і модулів, які полягають у створенні принципово нового за складом і властивостями метал-скляного захисного шару, який завдяки механізму багаторазового внутрішнього відбивання потоку у середовище поглинання відрізняється від сучасних аналогів структурною стабільністю і підвищеними на 30...40% значеннями масового коефіцієнта послаблення рентгенівських випромінювань $\mu_{\text{мас}}$, поглинає 28...56% енергії γ -випромінювань та захищає сталеві конструкції від корозійної дії хімічно активних речовин при транспортуванні РАВ на спеціалізованих судах і плавучих спорудах [1, 5, 9, 13, 26].

Удосконалено:

– та поглиблено систему показників якості композитних конструкцій на етапах виготовлення і експлуатації, взаємний вплив яких реалізований через причинно-наслідкові діаграми та когнітивні моделі, що розширює наукові уявлення про комплексну оцінку формування в динаміці техніко-експлуатаційних показників при проектуванні елементів біологічного захисту [15–18, 26];

– теоретичний підхід до проектування модулів біологічного захисту, який враховує конструктивні зміни шляхом комплексного захисту, його раціональне розташування на суховантажному судні разом з іншими вантажами і включає в себе розробку нової аналітичної моделі функціонування судна на основі побудови інформаційної системи завантаженості та алгоритмізацію вантажних операцій за дотриманням умов міцності [3, 14, 20];

– принципи оптимального вибору раціонального конструктивного рішення для елементів біологічного захисту шляхом формування комплексного коефіцієнту технологічності, які ґрунтуються на порівнянні різних варіантів конструкцій з урахуванням нових матеріалів і технологій захисту, що є необхідним для розробки організаційно-технічних заходів та прогнозування динаміки формування факторів економічної ефективності [10].

Набули подальший розвиток:

– метод оцінювання технічного стану композитних конструкцій суден і плавучих споруд, науково-методичні принципи якого на відміну від існуючих ґрунтуються на систематизації інформації щодо появи та розповсюдження дефектів у матеріалах і покриттях в умовах опромінення, термоциклічного навантаження, впливу хімічно активних середовищ та реалізовані через розробку інформаційних і когнітивних моделей, побудову алгоритму та причинно-наслідкових діаграм, що встановлює взаємний зв'язок між проектними і технологічними факторами на етапах проектування, виготовлення та експлуатації елементів біологічного захисту [11, 12];

– наукові уявлення про механізми руйнування шаруватих суднових конструкцій під дією теплових ефектів, в основу чого покладено теоретично і експериментально підтверджену гіпотезу про руйнування конструкцій через пошкодження у захисному метал-скляному шарі, що дає змогу на мікро- та нанорівні прогнозувати граничні умови експлуатації в діапазоні температур 50...500 °С під час транспортування і зберігання РАВ з остаточним тепловиділенням, термоциклічних навантажень, виникненні на судні пожежонебезпечних ситуацій [1, 2, 6, 8].

за спеціальністю 05.17.11

Вперше:

– теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість спікання порожніх скляних мікросфер (ПСМ) натрійборсилікатного складу з порошками алюмінію (у 50% об'ємному співвідношенні) зі встановленням закономірностей, які ґрунтуються на ліквідаційних процесах з поліморфними перетвореннями у структурно неоднорідних стінках ПСМ під час гарячого пресування ($P = 0,7 \dots 1,2$ МПа) в діапазоні температур 500...800 °С, що надає нові фізико-хімічні уявлення про спікання скляних мікросфер з металами з апробацією результатів на порошках бронзи і бабіту [21, 25, 36, 38–40];

– виявлено закономірності структуроутворення та створено теоретичні передумови для технології формування рівномірного метал-скляного захисного шару із заданими фізико-механічними і захисними властивостями по поверхні сталі марки Ст3 шляхом електродугового напилення суцільнотягнутих дротів Св-АМг5 і Св-08Г2С, до складу яких вперше додано натрійборсилікатні порожні скляні мікросфери, а також порошки, одержані сухим розмелом бою

стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$, що поглиблює наукові уявлення про фізико-хімічні процеси утворення і накопичення склофаз з формуванням міцного зв'язку на поверхні метал-скло [22, 25, 40, 41];

– науково обгрунтовано та встановлено вплив скляних мікросфер і порошків на ефект поверхневого зміцнення (у 2...2,5 рази) електродугових покриттів із Св-08Г2С і Св-АМг5, напилених на Ст3, в умовах γ -випромінювань Co^{60} , модель якого враховує структурні особливості опромінених зон та гальмування скляними включеннями поверхневої пористості через утворення концентрації напружень на поверхні метал-скло, що дає змогу розв'язувати конструкторські задачі щодо прогнозування міцності при транспортуванні на суднах радіоактивних вантажів [26, 27, 29].

Набули подальший розвиток наукові уявлення:

– про розроблення нових складів полі- та ультрадисперсних матеріалів і покриттів з переважним впливом на механізми послаблення γ - і рентгенівських випромінювань структурних елементів, а саме порожніх скляних мікросфер, суцільних скляних частинок за рахунок їх металізації під час введення до електродугових покриттів або спікання з порошками алюмінію та формування субструктурних елементів на поверхні поділу метал-скло, що дає змогу визначати необхідні товщини та прогнозувати екрануючу здатність при проектуванні елементів біологічного захисту на суднах і плавучих спорудах [27, 29, 32, 34, 35];

– про термомеханічні процеси у опромінених покриттях, наповнених ПСМ, які описані через температурні деформації мікрооб'ємів метал-скляного захисного шару, модель яких враховує, на відміну від існуючих аналогів, вплив пористості (10...20 %) і дисперсності скляних мікросфер (20...100 мкм), що дає змогу встановити граничні умови його застосування в діапазоні температур 50...500 °С і покладено в основу теорії руйнування конструкцій та елементів суден [23, 26].

Удосконалено:

– аналітичний опис взаємозв'язку між структурою композицій зі скляними дисперсними включеннями та їх механічними властивостями, який для склоалюмінієвих спечених матеріалів і метал-скляних електродугових покриттів на основі Св-08Г2С і Св-АМг5 наведено через ефективні пружні модулі, що дає змогу прогнозувати ефективність експлуатації шаруватих суднових конструкцій в умовах температурних навантажень і пожежонебезпечних ситуацій на судні [8, 24].

Значущість результатів роботи для науки полягає:

за спеціальністю 05.08.03 — у створенні нового наукового напрямку в теорії проектування елементів біологічного захисту суден та плавучих споруд, який ґрунтується на принципах комплексного захисту конструкцій від шкідливої дії радіоактивних вантажів і відведення тепла з найбільш розігрітих ділянок та містить знання про процеси розподілу температур і циркуляції повітря у вантажній зоні, поглинання енергії матеріалами конструкцій та їх знеміцнення, накопичення у них експлуатаційних дефектів;

за спеціальністю 05.17.11 — у розробленні наукових засад створення нових матеріалів і покриттів для захисту елементів суден від радіоактивних вантажів, які включають у себе нові наукові уявлення про фізико-хімічні про-

цеси з'єднання скла з металами при спіканні та електродуговому напilenні, механізми послаблення випромінювань структурними елементами і про вплив скляних включень на розвиток термомеханічних та корозійних процесів з визначенням граничних умов їх експлуатації.

На захист виносяться основні наукові результати роботи — сукупність наукових засад, спрямованих на підвищення комплексного захисту елементів суден від шкідливої дії РАВ шляхом розроблення нових метал-скляних матеріалів і покриттів та їх реалізацією у створенні нових проектних підходів і науково-методичних принципів оцінювання технічного стану.

Практичне значення отриманих результатів полягає:

за спеціальністю 05.08.03 — у розробленні науково обґрунтованих проектних, технологічних, методичних рекомендацій щодо вибору раціональних конструкторських рішень, прогнозування умов теплової безпеки та умов руйнування конструкцій з узагальненням інформації щодо їх пошкоджуваності, виготовлення і ремонту деталей запірної арматури вантажних систем; аналітичний оцінки інноваційного розвитку проектування та будування суден для радіоактивних вантажів, розгорнутій характеристиці техніко-економічних показників;

за спеціальністю 05.17.11 — у розробленні принципово нових складів комплексно-захисних матеріалів і покриттів для суднобудування, науково обґрунтованих практичних рекомендацій щодо одержання нових спечених скло-алюмінієвих матеріалів та електродугових метал-скляних покриттів, формування за їх участю шаруватих конструкцій та елементів біологічного захисту з розробленням клейової композиції холодного твердіння; удосконалення дослідницько-експериментального обладнання для спікання.

Технічну новизну отриманих результатів підтверджено патентами України на винахід № 74476, № 95378, № 111654; патентами на корисну модель № 90580, № 97311, № 99331. Результати роботи впроваджено у робочий процес Морського інженерного бюро (м. Одеса), Херсонського державного заводу «ПАЛАДА», ТОВ «Океан—Судноремонт» (м. Миколаїв), Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України (м. Миколаїв) та у навчальний процес Національного університету імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), що підтверджено відповідними актами.

Апробація результатів досліджень. Основні положення і результати роботи докладалися на Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 2010–2017 рр.); Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія» (м. Миколаїв, 2014–2016 рр.); Міжнародній конференції «Сучасні технології проектування, побудови та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (м. Миколаїв, 2016–2017 рр.); Міжнародній конференції «Композиционные материалы в промышленности» (м. Ялта, 2007–2010 рр.); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Зварювання та споріднені технології» (м. Миколаїв, 2012 р., 2014 р.); Міжнародній конференції «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-

практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2016–2017 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Современные порты — проблемы и решения» (м. Одеса, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы развития транспортной логистики» (м. Одеса, 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерні науки: освіта, наука, практика» (м. Миколаїв, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Управління проектами: стан та перспективи» (м. Миколаїв, 2010–2016 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» (м. Одеса, 2013–2017 рр.).

Публікації. Результати роботи опубліковані в 38 статтях у наукових фахових виданнях України, періодичних виданнях іноземних держав та виданнях, що входять до наукометричних баз даних (НМБ), 3 патентах на винахід, 3 патентах на корисну модель, 34 тезах доповідей.

Особистий внесок дисертанта підтверджено самостійними публікаціями (19 без співавторів), в яких наведено основні наукові і прикладні результати роботи, 3 патентами на винахід (2 без співавторів) та 3 патентами на корисну модель (2 без співавторів). Всі теоретичні і практичні положення, висунуті на захист, розроблено та сформульовано автором особисто; при розробці інформаційних та когнітивних моделей враховано консультації фахівців кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем і управління проектами НУК; опромінення зразків виконано на базі ДП «Радма» Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського. Певний вклад здобувача у наукових роботах, виконаних у співавторстві, наведено у списку робіт до автореферату.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з двох частин. Основна частина (495 стор., 160 рисунків і 77 таблиці: з них ілюстрацій на окремих аркушах — 23 сторінки, таблиць — 32 сторінки) містить розгорнуту анотацію українською та англійською мовами, зміст, умовні скорочення та позначення, вступ, вісім розділів, загальні висновки, список літературних та інформаційних джерел (407 найменувань). Друга частина (додатки, 130 стор.) містить використану нормативну документацію, схеми та методики постановки експериментальних досліджень, інструкцію з експлуатації розробленої установки, тексти комп'ютерних програм, патенти і акти впровадження результатів роботи, список публікацій здобувача.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності проблеми, зв'язок з науковими програмами і темами, формулювання мети, задач, об'єкта та предмета досліджень, наукової новизни і практичної цінності роботи, підтвердження апробації та повноту розкриття її основних положень, дані про структуру і обсяг дисертації.

У **першому розділі** «Елементи біологічного захисту суден та плавучих споруд для радіоактивних вантажів: наукові проблеми конструювання, проектування і підвищення захисту неметалічними матеріалами з полі- та ультрадисперсною структурою» наведено нормативну базу та умови перевезення РАВ водним транспортом, їх класифікацію і властивості; за викладеним досвідом

вітчизняних та зарубіжних компаній проаналізовано конструктивні особливості суден-прототипів. В результаті ретельного аналізу фундаментальних і прикладних наукових робіт, присвячених: проблемам створення спеціалізованих суден для транспортування небезпечних вантажів (автори: Г.В. Єгоров, В.В. Козляков, В.В. Зайцев, Ю.М. Коробанов), плавучих споруд (автори: О.С. Рашковський, О.В. Щедролоєв); моделюванню теплового стану на об'єктах зберігання радіоактивних відходів, які перебувають у різному агрегатному стані (автори: Ю.М. Мацевітий, С.В. Альохіна); міцності суднових конструкцій (автори: Л.І. Коростильов, Є.Т. Бурдун); оцінюванню їх технічного стану (автори: В.М. Тряскін, О.М. Нікітін, В.А. Кулеш, М.А. Москаленко), — сформульовано науково-технічну проблему розробки принципово нового підходу до проектування елементів біологічного захисту (які відокремлюють РАВ від інших вантажів, персоналу і обладнання) та виділено невирішені частини цієї проблеми:

- при проектуванні плавучих баз і сховищ не враховуються енергетичні характеристики, зокрема остаточне тепловиділення РАВ, характер розподілу полів температур та потоків повітря з визначенням застійних зон, що утворюють пожежонебезпечну ситуацію. Існуючі аналітичні методи, які ґрунтуються на вирішенні спряжених та зворотних задач теплообміну, сформульовано та розв'язано для технічних засобів наземного та підземного зберігання радіоактивних відходів, і через інші умови та механізми переносу тепла не можуть бути застосовані для плавучих об'єктів;

- не зважаючи на розвиток тенденцій роботи з базами даних, які містять графічні об'єкти інформації (фотографії пошкоджуваності, залежності розподілу зносів та напружень тощо), застосовані методи оцінювання технічного стану не мають вигляд комплексного аналітичного прогнозу життєдіяльності конструкцій на етапах проектування і виготовлення, а їх моделі і програми зосереджені у вузькопрофільних лабораторіях і центрах;

- існуючі методи проектування конструкцій включають у себе розв'язання задач синтезу та аналізу і не враховують механізмів взаємодії іонізуючих випромінювань, джерелами яких залишаються РАВ, з матеріалами конструкцій, що призводить до суттєвого підвищення товщин біологічного захисту і, як наслідок, масогабаритних показників елементів суден;

- традиційно застосовані бетонні конструкції з облицюванням з нержавіючої або плакованої сталі мають певні технологічні недоліки і експлуатаційні дефекти, що вимагає розроблення конструктивних рішень з використанням нових комплексно-захисних матеріалів, здатних працювати в умовах теплових та іонізуючих випромінювань, термічних навантажень і вібрацій;

- корозійні процеси, пов'язані зі зберіганням рідких РАВ та дезактивацією, викликають пошкодження суднових цистерн та деталей запірної арматури вантажних систем, що вимагає необхідності розроблення нових методів і складів для їх ремонту та відновлення.

Проаналізовано проблему впровадження сучасних радіаційно стійких матеріалів у суднобудівні технології; визначено, що підвищити техніко-експлуатаційні показники біологічного захисту можливо шляхом створення багаторазового послаблення потоку іонізуючих випромінювань застосуванням матеріалів

з різною поглинаючою та відбивною здатністю, зокрема поєднання скла з металами. Розвиток методів поводження з радіоактивними речовинами пов'язано з поширенням застосування стекол систем $\text{BaO}-\text{Cd}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$; $\text{Li}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$, $\text{PbO}-\text{TeO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{GeO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ для створення екранів від іонізуючих випромінювань, сорбційних і радіаційно стійких матеріалів радіохімічної промисловості. Проблемам радіаційних ефектів у стеклах присвячені роботи С. М. Бреховських, Л. М. Ланди, Ю. М. Вікторової, М. А. Чибисової, М. А. Четвірікова, О. С. Деркачової, де відмічена роль теплових процесів під час опромінювання. В роботах О. В. Острика, О. О. Філіпенка висвітлено досвід створення полімерних комплексно-захисних композицій, наповнених порожніми скляними мікросферами (ПСМ). Проаналізовано сучасний досвід їх застосування у технологіях суднобудівних та рентгенозахисних матеріалів, хімічний склад і фізико-хімічні процеси одержання, чому присвячено роботи В. В. Будова, В. Я. Стеценка, Е. Ф. Медведєва, С. В. Довгушева, Р. Tsugawa. Визначено, що застосування металізованих мікросфер сприятиме підвищенню теплопровідності та утворенню ефекту відбивання потоків у середовище поглинання, проте їх одержання є дороговартісним процесом, ускладненим великою кількістю бракування. Розглянуто теоретичні передумови з'єднання скла з металами шляхом дифузійного зварювання, паяння, спікання, електродугового напилення, чому присвячені роботи В. А. Преснова, В. А. Бачина, Н. Ф. Казакова, В. Ф. Квасницького, Г. А. Баглюка, А. М. Степанчука, О. М. Дубового, А. А. Карпеченка, у яких визначено, що для створення нерознімних з'єднань зі склом переважно обирати алюміній, мідь, залізо та його сплави, нікель, титан, ніобій, а при виборі компонентів слід надавати увагу їх температурі плавлення, коефіцієнтам теплопровідності та термічного лінійного розширення (ТКЛР), різниця у яких може викликати мікротріщини та руйнування через термічні напруження на границі метал–скло. Проте у цих наукових працях не розглянуто застосування порожніх скляних мікросфер, також недостатньо дослідженими залишаються питання впливу високотемпературних технологій композиційних матеріалів і покриттів (зокрема спікання, електродугового напилення) на структурний стан дисперсних скляних наповнювачів. Підкреслюючи необхідність розроблення конкурентоспроможних технологій одержання полі- та ультрадисперсних матеріалів і покриттів на основі скла, слід зазначити відсутність наукових публікацій про вплив скляних включень на радіаційну стійкість електродугових покриттів, а також недостатню кількість досліджень, присвячених термомеханічним процесам при опроміненні.

Виходячи з виконаного аналізу проблематики питання, обґрунтовано мету дисертаційного дослідження та сформульовано постановку завдань.

Другий розділ «Теоретичне обґрунтування науково-технічної проблеми і методологія постановки дисертаційного дослідження» [1, 5, 18, 31] присвячено розгляду науково-методичної бази дисертаційного дослідження, яка пов'язує розробку нових наукових засад в області суднобудування з проведенням теоретичних і експериментальних досліджень з розробки нових матеріалів і покриттів з переважним впливом на фізико-хімічні процеси формування їх структури і властивостей скляної складової, для чого за допомогою когнітив-

ного аналізу встановлено взаємний вплив між експлуатаційними показниками і структурними характеристиками композицій. Висунуто наукові гіпотези; надано теоретичне обґрунтування щодо вибору стеклових систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$, металевих порошків та зварювальних дрітків, наведено їх характеристики. Сформульовано дослідницькі завдання, теоретичні передумови постановки і методи досліджень. Охарактеризовано елементи біологічного захисту: модульного типу, що встановлюються, в основному, на суховантажних суднах, та блоків — для плавучих споруд, на яких зберігаються радіоактивні відходи у рідкому та твердому агрегатних станах. Визначено їх конструктивні особливості та експлуатаційні обмеження. Сформульовано проєктні, конструкторські та технологічні завдання, для чого обрано методичне забезпечення з теоретичними і експериментальними методиками.

Третій розділ «Фізико-хімічні процеси спікання порожніх скляних мікросфер з порошками алюмінію та структуроутворення метал-скляних електродугових покриттів на поверхні Ст3» [6, 21, 22, 25, 34, 35, 38–40, 41, 43] надає нові наукові уявлення про фізико-хімічні процеси з'єднання скла з металами при спіканні і електродуговому напиленні, які ґрунтуються на гіпотезах про мікрокристалічну будову скла, вибір складу якого обумовлено сучасним досвідом застосування в атомній енергетиці, радіохімічній промисловості та у технологіях одержання композицій для іммобілізації радіоактивних відходів.

Одержано сухим розмелом бою кришталевого посуду (ГОСТ 24315-80, мас. %: SiO_2 — 70,0; NaO_3 — 20,0; CaO — 8,0; B_2O_3 — 2,0) та рентгенозахисного оптичного скла (ГОСТ 9541-75, мас. %: SiO_2 — 55...57,33; K_2O_3 — 1,34...11,0; PbO — 33...40) порошки середньої тонкості ($d = 10 \dots 90$ мкм) губчастої форми, які за результатами мікрозондового рентгеноспектрального аналізу (МРСА) відносяться до стеклових систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$. Досліджено порожні скляні мікросфери системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ (ТУ 6-48-108-94, мас. %: SiO_2 — 69,0; B_2O_3 — 7,5; CaO — 6,0; Na_2O_3 — 13,5; ZnO — 2,0; F — 2,0) дисперсністю 20...100 мкм. Результати рентгеноструктурного аналізу (РСА) скляних мікросфер (рис. 1) довели їх загальну рентгеноаморфність з наявністю мікрокристалічних областей ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)_2$, $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ та поліморфних модифікацій SiO_2). Під час нагрівання до температури склування (745°C) після вигорання силанового апрету ($\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$) вони зазнають переходу у склоподібний стан, про що свідчить зниження інтенсивності ліній $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ та $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, зникнення ліній боратів натрію; з поліморфних модифікацій кремнезему на дифрактограмах переважають лінії α -тридиміту.

На відміну від мікросфер скляні порошки після їх відпалювання (у графітовому контейнері) в окисному середовищі при $t = 600^\circ\text{C}$ зазнають поверхневого

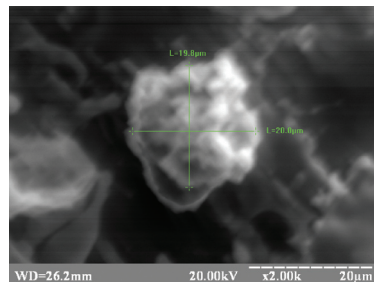


Рис. 1. Електронно-мікроскопічний знімок поверхні порожньої скляної мікросфери

оплавлення частинок і залишаються рентгеноаморфними, що свідчить про їх структурну однорідність.

Розроблено спосіб отримання склоалюмінієвих матеріалів, який полягає у гарячому пресуванні ($P = 0,7 \dots 1,2$ МПа, $t = 375 \dots 490$ °С) формувальної суміші, яка складається зі скляних мікросфер з порошком або пудрою Al (ГОСТ 6058-73, ГОСТ 5494-95) у рівних об'ємних долях з наступною ізотермічною витримкою при $t = 600 \dots 700$ °С. Вибір алюмінієвих порошоків пояснюється досвідом їх застосування у технологіях спікання з неметалевими порошками при виготовленні матеріалів для атомної енергетики. Визначення об'ємної кількості (50% об'ємн.) кожного з компонентів ґрунтується на умовах формування структури з рівномірним розподілом скляних включень у матриці, для чого повинно забезпечуватися змочування частинок скла алюмінієм шляхом утворення рідкої фази. Технологічні режими обрано виходячи з умов зберігання мікросферами сферичної форми та урахування температурного діапазону їх розм'якшення ($485 \dots 745$ °С). Удосконалено конструкцію і виготовлено лабораторний зразок експериментальної установки для спікання у вільному стані та гарячого пресування металевих і неметалевих порошоків, яка складається з шахтної печі з номінальною температурою 900 °С і окисною атмосферою та обладнана механічним пресуючим пристроєм з індикатором переміщення пуансону прес-форми, що дає змогу досліджувати та аналізувати термодетонаційні, зокрема усадочні процеси. Формування структури склоалюмінієвих матеріалів (рис. 2) відбувається за рахунок розм'якшення аморфної фази мікросфер, у стінці яких утворюються ультра- і мікропори, які завдяки капілярному ефекту та зовнішньому тиску заповнюються рідким алюмінієм. При виході на режим ізотермічної витримки розплавлений алюміній розтікається по поверхні мікросфери та заповнює пори, утворені при підготовці формувальної суміші; припинення усадочних процесів свідчить про завершення спікання.

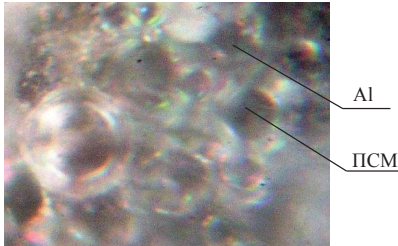


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 500$) склоалюмінієвого спеченого матеріалу композиції ПСМ–ПА-4 (50% об'ємн.)

у вільному стані та гарячого пресування металевих і неметалевих порошоків, яка складається з шахтної печі з номінальною температурою 900 °С і окисною атмосферою та обладнана механічним пресуючим пристроєм з індикатором переміщення пуансону прес-форми, що дає змогу досліджувати та аналізувати термодетонаційні, зокрема усадочні процеси. Формування структури склоалюмінієвих матеріалів (рис. 2) відбувається за рахунок розм'якшення аморфної фази мікросфер, у стінці яких утворюються ультра- і мікропори, які завдяки капілярному ефекту та зовнішньому тиску заповнюються рідким алюмінієм. При виході на режим ізотермічної витримки розплавлений алюміній розтікається по поверхні мікросфери та заповнює пори, утворені при підготовці формувальної суміші; припинення усадочних процесів свідчить про завершення спікання.

У межах обраних технологічних діапазонів мікросфери зберігають свою сферичну форму, залишаються рентгеноаморфними і не вступають у взаємодію з алюмінієм, зона контакту скло–Al має чітку поверхню поділу — стінку ПСМ товщиною 1 мкм, тобто утворюється ефект «металізованих мікросфер», що надає підвищених рентгенозахисних властивостей. Через нерівномірний розподіл або перегруповування частинок під час рідкофазного спікання в структурі утворюються ділянки спечених між собою мікросфер різного діаметра, формуються локальні субмікрокристалічні області α -тридиміту з розміром областей когерентного розсіювання (ОКР) до 90 нм. Щільність отриманих зразків складає $1000 \dots 1250$ кг/м³, пористість — 7...12%, розмір пор — 5...8 мкм.

Спосіб дає змогу виготовляти плитки розміром до 500 мм і товщиною $\delta \geq 10$ мм для формування шаруватих конструкцій, для чого запропоновано клейову композицію холодного затвердіння на основі епоксидно-діанової смоли марки ЕД-20 (ГОСТ 10589-84) і затверджувача амінометилфенолу марки УП-586Д з додаванням до 50% об'ємн. ПСМ. Застосування клейової композиції забезпечує міцність зчеплення з Ст3 на рівні 8,0...9,5 МПа, зі зразками склоалюмінієвих матеріалів — 11,0...13,0 МПа.

Формування по сталевій поверхні рівномірного метал-скляного шару можливо методом електродугового напилення (режими: сила струму — 80...140 мА; напруга — 25...28 В; тиск повітря — 0,4...0,6 МПа; дистанція напилення — 90...100 мм) з додаванням (до 35±7% об'ємн.) скляних мікросфер або порошоків і використанням суцільнотягнутих дротів марок Св-АМГ5 (ГОСТ 7871-75) і Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70), вибір яких пов'язано з наданням покриттям радіаційної стійкості. За матеріал підкладки обрано вуглецеву сталь марки Ст3 (ГОСТ 380–2005), яку широко застосовано у суднобудуванні для виготовлення транспортного обладнання (контейнерів, цистерн) з РАВ. При напиленні мікросфери, потрапляючи у зону електродугового розряду і переміщуючись з краплями розплавленого металу, зазнають короточасних температурних навантажень, які призводять до вигорання силанового апрету, і через ліквідаційні процеси, які відбуваються у стінках мікросфер, у покриттях на основі Св-08Г2С на поверхні поділу сталь-скло у відповідності з діаграмою стану Fe–Si (за перитектичною реакцією при температурі 1090 °C) утворюється нова ультрадисперсна фаза Fe_3Si_3 з розміром ОКР 87 нм, яка є стійкою до $t = 825$ °C, і в результаті передрекристалізаційної термічної обробки (ПТО) при $t = 500$ °C, $\tau = 5...15$ хв Fe_3Si_3 перетворюється на Fe_3Si з розміром ОКР 75 нм, що сприяє додатковому поглинанню енергії випромінювань. При напиленні Св-АМГ5 на поверхні поділу Al-скло нових фаз не утворюється, проте у обох випадках мікросфери зберігають форму (рис. 3), а розплавлений по їх поверхні метал утворює ефект «металізації».

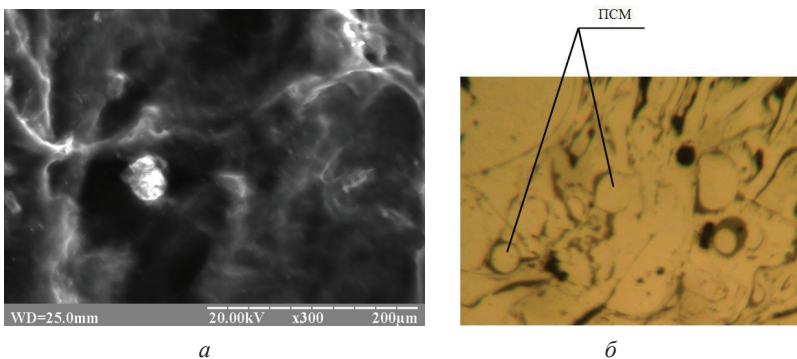


Рис. 3. Мікроструктура електродугових покриттів, наповнених ПСМ:
 а — Св-АМГ5 (електронно-мікроскопічний знімок поверхні);
 б — Св-08Г2С (оптична мікрофотографія, $\times 350$)

Формування метал-скляних електродугових покриттів, наповнених суцільними скляними частинками, на відміну від композицій з ПСМ, не пов'язано з ліквідаційними процесами у порошках, які являють собою здрібнений бій структурно однорідних скляних виробів: при напиленні вони зазнають часткового оплавлення (рис. 4) внаслідок термічної дії під час обволікання рідким розплавленим металом, залишаючись рентгеноаморфними; на поверхні поділу метал–скло нових фаз не утворюється.

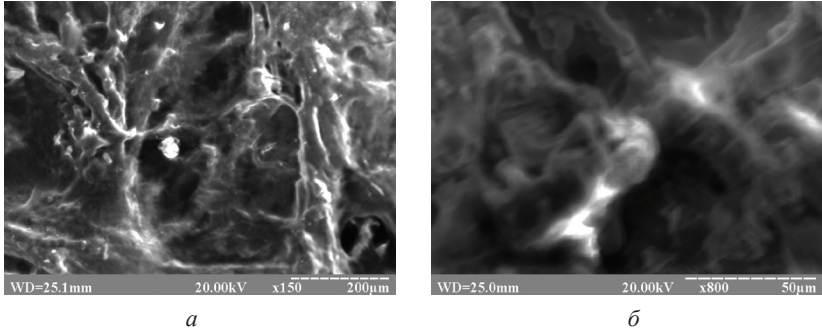


Рис. 4. Електронно-мікроскопічний знімок поверхні покриття на основі Св-АМг5, наповненого склом систем: *a* — $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$; *б* — $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$

Вірогідність наукових положень підтверджено проведеними авторськими дослідженнями щодо спікання ПСМ з порошками інших металів: бронзи марки Пр-Бр-АМц9-2 і бабіту марки Пр-Б83 та електродугового напилення дроту Св-08Г2С з додаванням алюмосилікатних мікросфер марки МПк 200-400. Одержані у розділі результати покладено в основу моделювання процесів послаблення іонізуючих та теплових випромінювань, прогнозування міцнісних властивостей в умовах судових вібрацій і теплових ефектів.

У четвертому розділі «Комплексно-захисні властивості спечених склоалюмінієвих матеріалів і метал-скляних електродугових покриттів» [9, 18, 23, 24, 26–29, 32, 33, 37, 41, 42] надано теоретичне і експериментальне обґрунтування доцільності застосування розроблених матеріалів і покриттів для проектування та виготовлення за їх участю елементів біологічного захисту. Зв'язок структури метал-скляних композицій з механічними властивостями у аналітичному вигляді описано через ефективні пружні модулі: умовний модуль об'ємного стиснення металевої матриці K_m та скляних включень K_s , ефективний модуль зсуву композицій G^* та ефективний ТКЛР α^* , які враховують експериментально отримані значення щільності, пористості, об'ємного наповнення склом. Встановлено, що зі збільшенням скляних наповнювачів (до 50% об'ємн.) у складі композицій на 35% зменшується теоретичне значення умовного модуля пружності об'ємного стиснення металевої матриці K_m ; у 5 разів зростає α^* метал-скляних композицій; на 40% знижується значення модулю зсуву G^* . Розвинута пориста структура (10...20%), яка може виступати як область ефективного стікання радіаційних дефектів, хоч і послаблює умовний модуль об'ємного

стискання металевої матриці K_m , проте удвічі знижує термічні навантаження та напруження на поверхні метал–скло в діапазоні температур 50...500 °С, які не залежать від складу скляного наповнювача (ПСМ або порошок скла). Розрахунково-експериментальні дослідження демпфірувальних властивостей, зокрема коефіцієнта вібраційних втрат ($\eta_{\text{вібр}} = 0,35 \dots 0,6$) і коефіцієнта розсіювання енергії ($\Psi = 10 \dots 20\%$), залежно від об'ємного вмісту скляних наповнювачів (10...40%) довели можливість експлуатації метал-скляних покриттів в умовах судових вібрацій у межах 40 Гц. Експериментально встановлено, що нанесення електродугових покриттів на основі Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнених ПСМ, у 3...6 разів підвищує демпфірувальну здатність пластинки Ст3; максимальне збільшення спостерігається для зразків з об'ємним наповненням 15%, подальше збільшення концентрації ПСМ у складі композиції Св-08Г2С на 5...15% призводить до зниження Ψ . Досліджено коефіцієнти теплопровідності, які складають: для метал-скляних покриттів на основі Св-08Г2С — 18...22 Вт/(м·К), Св-АМг5 — 61,5...70,0 Вт/(м·К), для склоалюмінієвих матеріалів 80...90 Вт/(м·К), що сприятиме відведенню тепла з розігрітих ділянок елементів суден. Експериментально визначені (табл. 1) рентгенозахисні характеристики (товщина шару половинного поглинання $\delta_{\text{кр}}$, масовий коефіцієнт послаблення, питомий свинцевий еквівалент $\delta'_{\text{рб}}$, рекомендована товщина шару) дають якісну оцінку та показують здатність композицій послаблювати рентгенівські випромінювання. Порівняння з відомими аналогами, такими як сферопластики та САПи, довели конкурентоспроможність розроблених матеріалів і покриттів, що пояснюється їх структурними особливостями, зокрема ефектом «металізації» скляних порошоків. Порожні скляні мікросфери на відміну від суцільних скляних частинок утворюють потрійний ефект поглинання потоку енергії, який посилюється зі збільшенням їх об'ємного вмісту у складі композицій; розвинута пориста структура збільшує анізотропію металевої матриці та викликає багаторазове розсіювання енергії променів; додатковому поглинанню яких сприяє формування субструктурних елементів з розміром ОКР 75...97 нм у покриттях композиції Св-08Г2С–ПСМ: в результаті ПТО масовий коефіцієнт послаблення рентгенівських випромінювань $\mu_{\text{мас}}$ зростає приблизно на 27%.

Доцільність застосування метал-скляних електродугових покриттів для захисту сталевих поверхонь експериментально підтверджено в умовах γ -випромінювань: зразки Ст3 з нанесеним з одного боку шаром товщиною $\delta = 2$ мм піддавалися протягом 7 год опроміненню енергіями Co^{60} з сумарною активністю джерел 37127 Кі. При поглинанні дози випромінювань D 12,5 кГр і 100 кГр зразки з покриттями зберігають стабільними механічні властивості (σ_b і σ_T), тоді як за їх відсутності спостерігається зростання на 22...25% границі міцності на розрив σ_b і границі текучості σ_T , на 15 % — твердості за Віккерсом HV_5 . Встановлено, що покриття на основі Св-08Г2С екранує Ст3 на 28%, на основі Св-АМг5 — на 56%; порівняльні дослідження з іншими композиційними матеріалами, наповненими свинцевмісним склом, показали ефективність застосування метал-скляних покриттів, кратність послаблення

γ -випромінювань яких наближується до кратності пластинки з Pb. При опроміненні енергіями $E = 2,0; 4,5$ MeB у метал-скляних електродугових покриттях не виникає структурно-фазових перетворень, проте спостерігається збільшення поверхневої пористості, що вважається ознакою радіаційної пошкоджуваності, але для наповнених склом композицій є менш очевидним та пояснюється тим, що скляні включення утворюють концентрацію напружень, де відбуваються теплові втрати, а й «гальмують» розвиток пористості. Це доведено за допомогою моделювання термомеханічних процесів у опроміненому шарі покриттів. Визначити температурні деформації мікрооб'єктів стає можливим за допомогою удосконаленої термомеханічної моделі, яка на відміну від моделей, запропонованих для сферопластиків, дає змогу на мікрорівні прогнозувати умови руйнування по поверхні поділу метал–скло в залежності від пористості, об'ємного наповнення склом та діаметра ПСМ. В основу моделювання покладено знання про елементарну комірку, складені за результатами мікроструктурних досліджень. Розрахунково визначено небезпечний напружений стан на межі метал–скло (рис. 5, а) і спечених між собою мікросфер (рис. 5, б) у структурі склоалюмінієвих матеріалів під час транспортування РАВ з температурою до 500 °С.

Таблиця 1. Рентгенозахисні властивості композицій

Композиція	$\delta_{кр}$, см	$\mu_{мас}$, [см ² /г]	Питомий свинцевий еквівалент $\delta'_{рб}$	Рекомендована товщина шару (еквівалентна 3 мм Pb)
<i>Електродугові покриття на основі Св-АМг5 (35±7 % об'ємн. скла)</i>				
Св-АМг5 – ПСМ	0,025	18,6	0,75	4,0
Св-АМг5 – натрійсилікатне скло*	0,027	14,19	0,65	4,4
Св-АМг5 – свинцевмісне скло**	0,026	14,5	0,7	4,25
Св-АМг5 (без наповнювача)	0,052	7,9	0,35	8,35
<i>Склоалюмінієві матеріали (50 % об'ємн. ПСМ)</i>				
ПСМ – Al-порошок	0,031	18,4	0,6	5,07
ПСМ – Al-порошок	0,042	14,9	0,45	6,85
<i>Електродугові покриття на основі Св-08Г2С (35±7 % об'ємн. скла)</i>				
Св-08Г2С – ПСМ	0,023	4,93	0,75	3,78
Св-08Г2С – натрійсилікатне скло*	0,032	2,99	0,45	6,48
Св-08Г2С – свинцевмісне скло**	0,037	3,03	0,5	6,0
Св-08Г2С (без наповнювача)	0,040	2,46	0,6	5,31
<i>Порівняння з аналогами</i>				
Al-Al ₂ O ₃ (аналог САПів)	0,030	13,5	0,6	4,9
Al-SiC	0,025	14,0	0,75	4,0
Синтактичне піноскло	0,013	14,6	0,14	21,36
Сферопластик ЕДС-7А	0,013	7,8	0,14	21,0
Сферопластик з додатковою пористістю	0,033	3,6	0,05	53,67
Клейова композиція ЕД-20-ПСМ (50 % об'ємн.)	0,015	7,0	0,15	23,5

* — скло системи Na₂O–CaO–SiO₂

** — скло системи K₂O–PbO–SiO₂

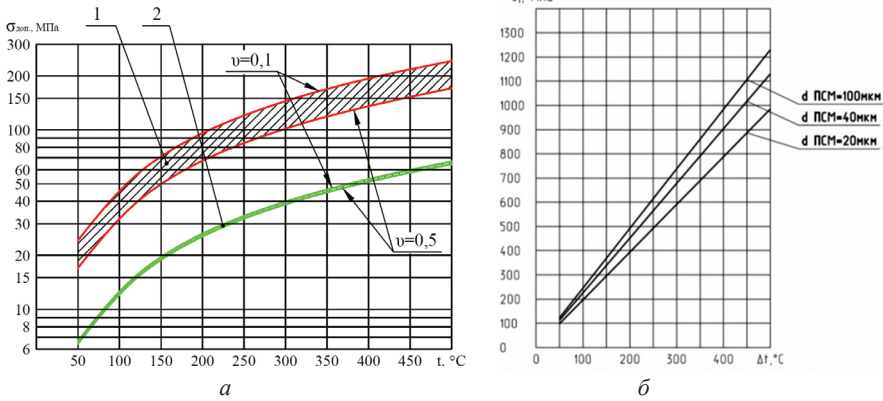


Рис. 5. Температурні напруження у мікрооб'єктах:

а — на поверхні поділу метал-скло у композиціях: 1 — алюміній-скло; 2 — сталь-скло; б — на межі між спеченими скляними мікросферами

Внаслідок теплових ефектів опромінення в місцях найбільшої концентрації напружень формуються субструктурні елементи з розміром ОКР 80...110 нм, у результаті чого зростає у 2,0...2,5 рази мікротвердість металевої матриці покриттів. Висуваючи припущення, що тепла енергія рівномірно та повністю поглинається метал-скляним шаром, за допомогою аналітичного моделювання досліджено її розподіл по перерізу у напрямку до Ст3, у результаті чого визначено, що при однаковій поглинутій енергії через більш низьку теплопровідність скла основна кількість тепла поглинається металевою матрицею, про що свідчить незмінність мікротвердості скляних включень ($H_{\mu 200} = 1270...1350 \text{ МПа}$). Експериментально встановлений ефект поверхневого зміцнення, який через формування більш низьких температур послаблюється у напрямку до основного металу, покладено в основу моделі, де фізична постановка задачі полягає у формуванні під дією теплових ефектів температурних полів; при поглинанні теплоти кожним із шарів покриття в місцях найбільшої концентрації напружень формуються наноструктурні елементи. Встановлений ефект найбільш очевидний для покриттів, наповнених ПСМ, що пояснюється їх низькою теплопровідністю ($\lambda = 0,027 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) у порівнянні з суцільними скляними частинками ($\lambda \approx 0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$). Розроблена модель описує характер зміцнення метал-скляного покриття в умовах транспортування РАВ, які є джерелами γ -випромінювань, та дає нові наукові уявлення про механізми поглинання теплової енергії під час опромінення шарами структурно-неоднорідних композицій з утворенням субструктурних елементів. Встановлено механізми корозійних руйнувань опромінених електродугових покриттів, які при витримці (до 840 годин) в умовах 20%-розчинів HCl , H_2SO_4 , HNO_3 виконують роль дифузійного бар'єра, попереджаючи пошкодження Ст3; поряд з хімічною корозією матриці хімічної деструкції скляних включень не спостерігається, проте технологією рекомендовано додаткове просочення рідким скло. Це дає змогу за-

стосовувати розроблені покриття для захисту цистерн зберігання рідких РАВ, які під час тривалої експлуатації зазнають дезактивації розчинами на основі кислот; на відміну від існуючих технологій гумування або нанесення лакофарбових і епоксидних композицій, метал-скляні покриття на основі Св-АМг5 і Св-08Г2С перешкоджають доступу агресивного середовища до основного металу, гальмують процес його руйнування та можуть бути легко замінені при виконанні ремонтно-профілактичних робіт.

Одержані результати надають нові наукові уявлення, які на мікро- та нанорівні встановлюють взаємний зв'язок між структурою розроблених матеріалів і покриттів та їх експлуатаційними властивостями, розвиток термомеханічних процесів при опроміненні і визначають граничні умови щодо їх руйнування.

П'ятий розділ «Науково-методичні принципи оцінювання технічного стану судових композитних конструкцій на етапах проектування, виготовлення та експлуатації» [11, 12, 15–17, 26, 30] містить постановку і розв'язання за допомогою методів системного аналізу задач: підвищення якості композитних судових конструкцій; управління процесами підвищення техніко-економічних показників під час проектування елементів біологічного захисту за умовами дотримання експлуатаційних вимог (зовнішніх факторів) та шляхом варіювання характеристиками розроблених матеріалів і покриттів (внутрішніх факторів); інформаційної підтримки оцінювання технічного стану. За допомогою побудови причинно-наслідкових діаграм Парето та Ісікави виявлено конструктивні та виробничо-технологічні дефекти, розроблено заходи щодо їх попередження. Проектна оцінка підвищення техніко-економічних показників елементів біологічного захисту представлена у вигляді двох когнітивних моделей з реалізацією взаємного впливу внутрішніх і зовнішніх факторів шляхом формування матриці суміжності. Моделювання ситуації з постановкою числових експериментів та розв'язанням прямих і обернених задач показує добру узгодженість одержаних результатів аналітичного прогнозу, моделювання теплового стану вантажної зони (розділ 7) та експериментальних досліджень зразків метал-скляних матеріалів і покриттів, візуалізує взаємний вплив проектних і експлуатаційних факторів з реалізацією механізмів прийняття рішень при оцінюванні технічного стану. На підставі експериментальних випробувань запропоновано наступну класифікацію експлуатаційних дефектів, в основу якої покладено пошкоджувальність матеріалів та зміна їх структури внаслідок:

- опромінення (радіаційні дефекти): їх джерелами можуть стати неупаковані тверді радіоактивні відходи (елементи обладнання, металовиробів тощо), рідкі радіоактивні речовини, вантажі з пошкодженою упаковкою;
- короткочасного або тривалого впливу температури на матеріали конструкцій (дефекти термічного впливу) внаслідок екзотермічних процесів, пожежонебезпечних та аварійних ситуацій;
- впливу на матеріали конструкцій хімічно активних середовищ, зокрема рідких РАВ, розчинів для дезактивації (корозійні дефекти);
- механічних пошкоджень під час вантажно-розвантажувальних робіт (дефекти випадкового характеру): це можуть бути механічні пошкодження від з'єднувальних елементів та внаслідок злому тощо.

Для систематизації інформації, яка є необхідною на етапах проектування, виготовлення та експлуатації композитних конструкцій, розроблено нову інформаційно-пошукову систему «*PROTECTIVE COATINGS DATA*»: Web-додатки написано мовою програмування PHP, програмний продукт — мовою SQL, який може працювати під управлінням операційних систем Linux, Windows. Основним елементом системи є інформаційно-пошуковий масив документально-фактографічного типу, до якого заносяться технологічні режими підготовки поверхні, напилення, гарячого пресування; інформація щодо властивостей, характеристики вихідних компонентів з графічними об'єктами, результати випробувань зразків в умовах теплових та іонізуючих випромінювань, термоциклічних навантажень, вібрацій, корозійного впливу хімічно активних середовищ, що дасть змогу виключити певні ремонтні роботи через вживання профілактичних заходів. Діагностика здійснюється шляхом порівняння мікроструктур та властивостей зразків при відборі проб з вихідними даними; розроблено алгоритм оцінювання технічного стану композитних конструкцій.

У шостому розділі «Проектне обґрунтування та технологічні рекомендації щодо виготовлення модульного елемента біологічного захисту для суховантажного судна» [3, 5, 6, 14, 20] вирішено науково-технічне завдання удосконалення модульної конструкції біологічного захисту: кожна з панелей являє собою жорстко закріплену за допомогою швелерів тришарову плоску пластину, жорсткість якої забезпечується плитою товщиною 200 мм з радіаційно-стійкого бетону (ГОСТ 7473-94), яка на відміну від існуючих лише з одного боку облицьована листовою сталлю ВСт3 (ГОСТ 5521-93) товщиною 10 мм, на яку нанесено шар метал-скляного електродугового покриття або за допомогою розробленої клейової композиції кріпляться склоалюмінієві плитки розміром до 500 мм (рис. 6). Розроблено практичні рекомендації щодо виготовлення збірно-розбірних панелей площею до 50 м² модулів біологічного захисту з використанням нових матеріалів і покриттів та їх монтажу у трюмі суховантажного судна.

Розрахунки геометричних розмірів модуля ($l=8,478$ м; $b=7,296$ м; $h=4,106$ м) виконано на прикладі розміщення всередині нього двох 20 футових високих ISO-контейнерів (рис. 7), де всередині кожного з них розташовано у два ряди 54 бочки висотою і діаметром відповідно 880 і 610 мм, наповнені урановим рудним концентратом. Конструкція модуля на відміну від існуючої має знижену

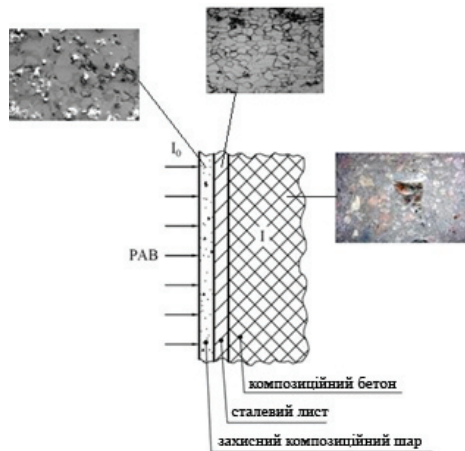


Рис. 6. Модель панельної конструкції:
 I_0 — падаючий потік випромінювань від
 РАВ; I — потік, поглинутий бетонним шаром

на 14,5 т ($\approx 10\%$) масу, що дає змогу розширити асортимент вантажів та підвищити завантаженість судна.

В результаті теоретичних досліджень розроблено аналітичну модель функціонування суховантажного судна для транспортування РАВ, в основу якої покладено інформаційну підтримку та принципи завантаженості судна, що реалізовано у вигляді алгоритму (рис. 8) за допомогою мови програмування Java. В основу математичної моделі і проектування інформаційної системи покладено класичну задачу про ранець, для реалізації якої застосовано генетичний алгоритм, який дозволяє шляхом варіювання графів вирішувати завдання проектування і конструювання. За цільову функцію (1) обрано мінімізацію сталісного часу (термін, протягом якого здійснюється завантаження судна без додаткових до суми фрахту платежів); задачу розв'язано введенням до розрахунків показника норм навантаження шляхом монтажу у трюмі судна модуля та додатковим завантаженням іншими вантажами. Модель процесу аналізу даних побудовано у вигляді системи рівнянь (2), де чиста вантажопідйомність D_n і вантажомісткість W є функціями характеристик вантажу, геометричних розмірів та розташування вантажних приміщень суховантажного судна (3).

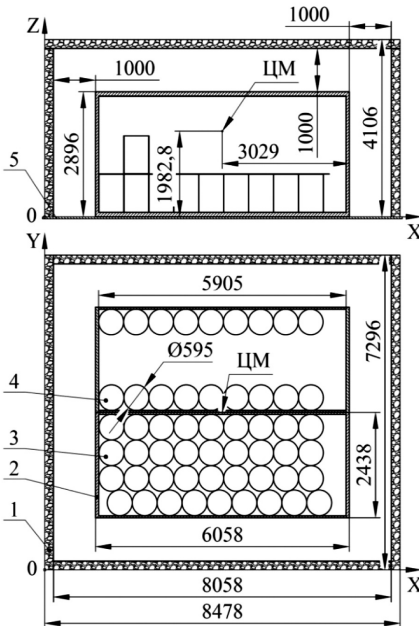


Рис. 7. Розрахункова схема укомплектування модуля:
1 — стінка модуля; 2 — стінка контейнера; 3 — бочки першого шару укладки; 4 — бочки другого шару укладки; 5 — днище

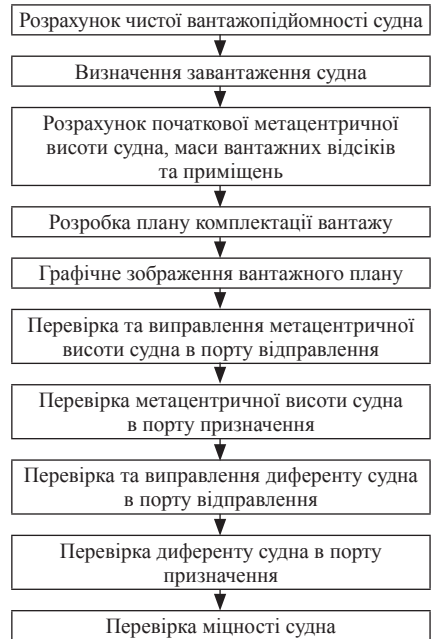


Рис. 8. Алгоритм програми розрахунків завантаженості судна

$$t_{\text{ст}} = \sum_{j=1}^m t_{j\text{ст}} = \sum_{j=1}^m \frac{\sum_{i=1}^{i \leq n} x_{ji}}{N_{ji}} \rightarrow \min; \quad (1) \quad \begin{cases} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ji} = D_{\text{ч}} \\ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n u_i x_{ji} = W \\ x_{ji} > 0 \end{cases} \quad (2) \quad i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}, \quad (3)$$

де $t_{\text{ст}}$ — сталійний час судна; $t_{j\text{ст}}$ — час вантажної обробки j -го трюму; x_{ji} — кількість i -го вантажу в j -му трюмі; N_{ji} — норма навантаження i -го вантажу в j -й трюмі; m — кількість вантажних приміщень; n — кількість вантажів; $D_{\text{ч}}$ — чиста вантажопідйомність судна; W — вантажомісткість судна; u_i — питомий навантажувальний обсяг вантажу.

Як граничні умови введено функції перевірки відповідності комбінації вантажу у трюмі обов'язковим критеріям завантаження.

$$\begin{aligned} \Phi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \text{true}; \\ \Phi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \bar{P}; \\ \Phi_3(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \bar{S}; \\ \Phi_4(x_1, x_2, \dots, x_n) &= d_{\text{опт}}; \\ \Phi_5(x_1, x_2, \dots, x_n) &= +h_k; \\ \Phi_n & \end{aligned} \quad (4)$$

де $\Phi_1(x_1, x_2, \dots, x_{mn})$ — функція сумісності вантажів, параметрами якої є властивості j -го вантажу, повинна повертати результат *true*, тобто вантажі мають бути сумісними для перевезення в одному приміщенні;

$\Phi_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — функція визначення послідовності завантаження трюму відповідно до портів заходу, повинна повертати вектор $\bar{P}$, тобто послідовність завантаження;

$\Phi_4(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — функція перевірки диференту судна на оптимальність при заданому розміщенні вантажу в трюмі;

$\Phi_5(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — функція перевірки остійності судна; результат повинен бути додатнім числом;

Φ_n — інші функції перевірки дотримання критеріїв завантаження.

Таким чином, на етапі початкового проектування враховуються властивості вантажів, особливості їх обробки і вантажних операцій, дотримання умов міцності. Задачу розв'язано для умов лінійного рейсу, що є доцільним для вантажопотоків великих об'ємів. Наочність розробки продемонстровано на прикладі транспортування двох видів небезпечних вантажів — уранового рудного концентрату і аміачної селітри; актуальність обраного маршруту Одеса—Генуя обумовлено географічним розташуванням місць видобування уранової руди (Миколаївська і Кіровоградська області), а також розташуванням підприємств атомної енергетики у Південній Європі. Формалізацію області допустимого стану представлено у вигляді документації по судну з базою даних, в основу проектування якої покладено завдання мінімізації дублювання даних і спрощення процедур їх обробки та поновлення. Доведено можливість застосуван-

ня удосконаленої конструкції модуля біологічного захисту на суховантажному судні серії «Beluga» на прикладі одночасного транспортування уранового рудного концентрату і аміачної селітри. Оціночні розрахунки міцності показали, що розташування спроектованого елемента у трюмі суховантажного судна не порушує умов загальної міцності.

Ефективність застосування захисних модулів підтверджено моделюванням процесів руйнування конструкцій у пожежонебезпечних ситуаціях на судні, для чого сформульовано та розв'язано у пружній постановці методом скінченних елементів задачу короткотривалого термічного навантаження панелі модуля як двошарової пластини (сталь–покриття) із застосуванням експериментально одержаних (розділ 4) значень механічних властивостей опромінених пластин Ст3 з покриттями. Граничні умови постановки задачі максимально наближені до експлуатаційних при транспортуванні РАВ з питомою активністю до 0,4 МБк/кг і 40 ГБк/кг; за результатами визначено ймовірність руйнування панелей при термічних навантаженнях до 300 і 570 °С по поверхні поділу сталь–покриття, що узгоджується з експериментальними дослідженнями термостійкості. Еквівалентні напруження $\sigma_{\max}$ для з'єднання Ст3–покриття (Св-АМг5–скло) складають 136 МПа, Ст3–покриття (Св-08Г2С–скло) — $\sigma_{\max} = 650$ МПа. Отримані результати дають уявлення про максимальний ресурс з'єднань та структурну стабільність метал-скляних електродугових покриттів в умовах, найбільш наближених до пожежонебезпечних, але в дійсності при виникненні аварійно небезпечних ситуацій елементи біологічного захисту не зазнають багаторазових температурних навантажень.

У цьому розділі «Проектне дослідження та вибір раціональної конструкції блоків біологічного захисту плавучих споруд за обмеженнями потужності остаточного тепловиділення радіоактивних вантажів» [2, 7–9, 13, 19, 20] на основі дослідження процесів теплообміну у вантажній зоні запропоновано новий підхід до проектування елементів плавучих споруд, для чого вперше сформульовано і розв'язано у спряженій та плоскій постановці стаціонарну задачу (незалежну від часу та погодних умов) про тепловий стан вантажної зони, яка враховує потужність остаточного тепловиділення РАВ і процеси теплообміну між вантажами та повітрям, яке циркулює у просторі подвійного борту і дна (рис. 9).

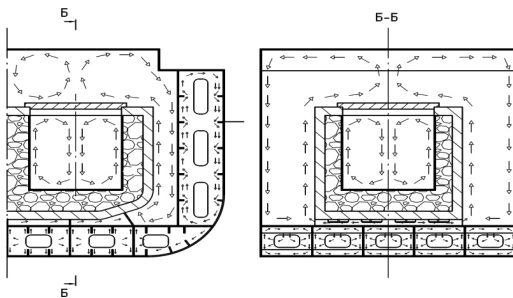


Рис. 9. Розрахункова схема процесів теплообміну у вантажній зоні

У постановочному плані РАВ (незалежно від агрегатного стану) завантажуються у два симетрично розташованих циліндричних баки (цистерни), які разом з корпусом із плакованої сталі та бетонною заливкою являють собою блок, що виконує функцію біологічного захисту на плавучому об'єкті (далі блок біологічного захисту).

В основу розв'язання задачі покладено модель одиночного бака з багат шаровою теплопровідною стінкою, який із середини рівномірно нагрівається РАВ з потужністю остаточного тепловиділення $Q = 2 \text{ кВт}; 8 \text{ кВт}; 20 \text{ кВт}$. Задача розглядається симетричною відносно діаметральної плоскості плавучої споруди та не враховує наявності вентиляції, зовнішній корпус блока виконано у вигляді паралелепіпеда з урахуванням закруглень корпусу судна. В обчисленнях не враховуються швидкості заборотної води та повітря, температури вантажів у симетричних баках прирівнюються; на торцевих стінках не відбувається теплообміну із сусідніми відсіками (адіабатичні стінки); коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній стінці корпусу судна $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2$, температура $t = 10^\circ\text{C}$. В основу числового моделювання покладено математичний опис процесів теплообміну при природній конвекції та вільному турбулентному русі розігрітого повітря (як нестисливої рідини) уздовж вертикальної пластини з висотою бака x . Явище тепловіддачі (5) з поверхні описується за допомогою критеріальних рівнянь, які для випадку умов зберігання РАВ на плавучих спорудах мають вигляд (5)–(10), враховують критерій Нуссельта $Nu_{жк}$ (6), який не залежить від координати x ; температура повітря у просторі подвійного дна розраховується як середнє значення (7). Число Грасгофа $Gr_{жк}$ на координаті x у діапазоні температур у межах заданих товщин для багат шарової стінки бака, яка складається з n шарів з різними товщинами та теплопровідністю, визначається за формулою (9) та враховує коефіцієнт температурного розширення повітря β уздовж стінки (8) і коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu_{ж}$ при температурі повітря $T_{п}$, $\nu_{ж} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; відносна температура стінки розраховується за формулою (10):

$$\alpha_{БЗ} = \frac{Nu_{жк} \cdot \lambda_{жк}}{x}; \quad (5) \quad Nu_{жк} = 0,15 \cdot (Gr_{жк} \cdot Pr_{жк})^{1/3} \cdot (Pr_{жк}/Pr_c)^{0,25}; \quad (6)$$

$$T_{в} = \frac{T_{зБЗ} + T_{зв}}{2}; \quad (7) \quad \beta = \frac{1}{273 + T_{жк}}; \quad (8)$$

$$Gr_{жк} = \int_{T_0}^{T_{п}} \frac{g \beta \nu_{ж} x^3}{\nu_{ж}^2}; \quad (9) \quad T_c = \int_{Q_0}^{Q_i} T_{жк} - \int_{T_0}^{T_{зБЗ}} T_c; \quad (10)$$

де $T_{зБЗ}$ — температура на зовнішній стінці блока, К; $T_{зв}$ — температура заборотної води, К; T_0 — температура вантажу при різній потужності тепловиділення, К; T_c — температура у будь-якій точці шару конструкції, К; $T_{жк}$ — температура потоку повітря уздовж внутрішньої стінки бака для РАВ, К; Q_0 — потужність тепловиділення вантажу (Вт) у процесі транспортування при $T = 273$, К; Q_i — гранична потужність тепловиділення вантажу, Вт; $\lambda_{жк}$ — коефіцієнт теплопровідності повітря при температурі $T_{п}$, Вт/(м·К); $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}$ — прискорення вільного падіння; $Pr_{жк}$ — значення числа Прандтля для повітря при температурі $T_{п}$; Pr_c — значення числа Прандтля для повітря при температурі стінки T_c .

Рівняння теплового балансу у постановочному для числового моделювання плані буде мати вигляд

$$\frac{m_{вант}}{V_{бака}} \frac{\partial Q}{\partial T} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \Delta H w, \quad (11)$$

де $m_{\text{вант}}$ — маса вантажу нетто, кг; $V_{\text{бака}}$ — об'єм бака (цистерни), м^3 ; Q — теплови-ділення вантажу, яке дорівнює потужності остаточного тепловиділення РАВ, Вт; координата x — висота бака, м; t — час (не враховується у випадку стаціонарної задачі); T — температура циркулюючого повітря, К; v — лінійна швидкість потоку повітря, $\text{м}/\text{с}^2$; λ — коефіцієнт теплопровідності РАВ, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; ΔH — тепловий ефект екзотермічної реакції, Дж; w — швидкість екзотермічної реакції, $\text{м}/\text{с}$.

Постановка задачі про тепловий стан встановлює взаємний зв'язок між енергетичними характеристиками РАВ та геометричними розмірами моделі, її розв'язання у спряженій постановці має важливе значення як для проектування, так і для модернізації існуючих плавзасобів під зберігання РАВ: шляхом варіювання проектними параметрами, товщинами та теплопровідністю обраних матеріалів можна прогнозувати тепловий стан і визначати температурні поля, інформація про які є необхідною для прогнозування міцності.

Проектне дослідження, яке включає в себе розв'язання поставленої задачі у спряженій формі за допомогою числового моделювання для різних варіантів конструктивно-компонувальних рішень, виконано на прикладі плавбази з певними розмірностями, яку у зарубіжній практиці застосовують для тривалого зберігання високоактивних радіоактивних відходів. Обраний метод дає змогу на кожному з етапів дослідження одержувати нову інформацію з коректуванням вибору матеріалів та їх товщин. При моделюванні розглянуто різні конструктивно-компонувальні варіанти з вбудованими та вкладеними баками для РАВ, виготовленими з нержавіючої сталі марки 12Х18Н9Т (ГОСТ 5632-72) та вуглецевої сталі марки ВСтЗсп (ГОСТ 5521-93) з нанесеним на внутрішню поверхню шаром метал-скляного покриття (рис. 10) та склоалюмінієвим облицюванням внутрішньої поверхні кришки. Розрахунки виконано з урахуванням товщин і коефіцієнтів теплопровідності обраних матеріалів: зовнішній корпус із плакованої сталі (ГОСТ 10885-85), $\delta = 400$ мм, $\lambda = 42$ Вт/(м·К); бетон (ГОСТ 25192-2012), $\delta = 800 \dots 1000$ мм, $\lambda = 0,12$ Вт/(м·К); вкладена цистерна для РАВ із ВСтЗ (ГОСТ 5521-93), $\delta = 50$ мм, $\lambda = 40$ Вт/(м·К), товщина кришки 300 мм.

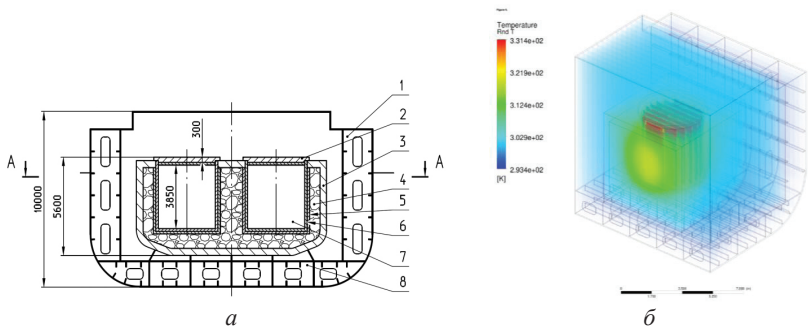


Рис. 10. Моделювання теплового стану вантажної зони плавучої споруди:

- a — розрахункова схема; b — поля температур при зберіганні РАВ з $Q = 2$ кВт:
 1 — подвійний борт; 2 — кришка; 3 — зовнішній корпус блока; 4 — бетонна заливка;
 5 — баки для РАВ; 6 — метал-скляне покриття; 7 — РАВ; 8 — подвійне дно

Одержані у вигляді полів температур і швидкостей повітря результати показали нерівномірність розподілу температур по об'єму вантажної зони, найбільш розігрітою є верхня частина моделі, наближена до кришки: $T = 340$ К при $Q = 2$ кВт, $T = 610$ К при $Q = 20$ кВт. Встановлено, що нанесення електродугових покриттів композицій Св-08Г2С–скло ($\delta = 2$ мм) з коефіцієнтом теплопровідності $18...22$ Вт/(м·К) не впливає на зміну теплового стану вантажної зони. Облицювання склоалюмінієвими плитками з $\lambda = 80...90$ Вт/(м·К) і $\delta = 50$ мм внутрішньої поверхні кришки та нанесення на внутрішню поверхню цистерн

для РАВ склоалюмінієвого електродугового покриття з $\lambda = 61,5...70,0$ Вт/(м·К) і $\delta = 2$ мм знижує температуру зовні приблизно на $60...80$ градусів. В результаті розв'язання задач у тривимірній та плоскій постановках для випадку із застосуванням розроблених метал-скляних електродугових покриттів, нанесених на внутрішню поверхню бака з РАВ та у вигляді облицювання склоалюмінієвими плитками внутрішньої поверхні кришки, визначено проектні обмеження за потужністю остаточного тепловиділення на рівні $Q_{\text{пит}} = 230$ Вт/м³ (рис. 11), що забезпечує зберігання РАВ на плавучій споруді без облаштування засобами примусового охолодження, які треба передбачати для зберігання РАВ з більшим Q . Одержані результати показали доцільність зменшення товщини бетонного шару, що підтверджено розв'язанням плоскої задачі про еквівалентну теплопровідність шаруватої стінки, при постановці якої циліндричний бак (або цистерна) представлено у вигляді моделі зі спрощеною геометрією.

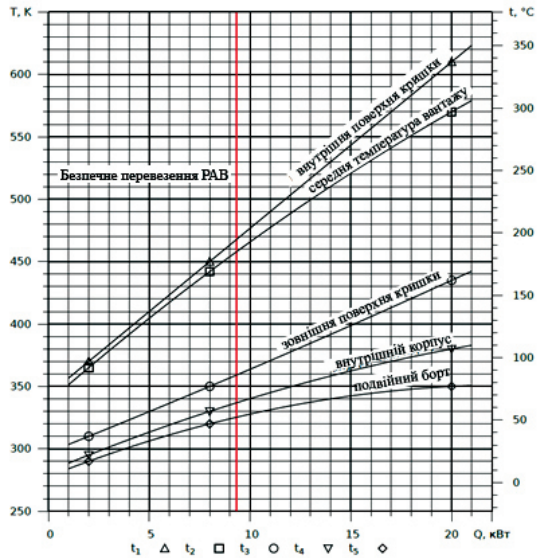


Рис. 11. Вплив потужності тепловиділення РАВ на розподіл температур у вантажній зоні плавучої споруди

Введено поняття еквівалентної теплопровідної стінки товщиною $\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i$,

для якої $\lambda_{\text{екв}}$ у випадку облицювання склоалюмінієвими плитками визначається за формулою (12), а для конструкції зі склоалюмінієвим електродуговим шаром — за формулою (13):

$$\lambda_{\text{екв}} = \delta / \left(\frac{\delta_{\text{покр}}}{\lambda_{\text{покр}}} + \frac{\delta_{\text{кл}}}{\lambda_{\text{кл}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta_{\text{бет}}}{\lambda_{\text{бет}}} \right); \quad (12) \quad \lambda_{\text{екв}} = \delta / \left(\frac{\delta_{\text{покр}}}{\lambda_{\text{покр}}} + \frac{\delta_{\text{кл}}}{\lambda_{\text{кл}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta_{\text{бет}}}{\lambda_{\text{бет}}} \right), \quad (13)$$

де товщина і коефіцієнт теплопровідності відповідно: $\delta_{\text{бет}}$, $\lambda_{\text{бет}}$ — бетонного шару; $\delta_{\text{ст}}$, $\lambda_{\text{ст}}$ — сталевій стінки; $\delta_{\text{покр}}$, $\lambda_{\text{покр}}$ — метал-скляного шару; $\delta_{\text{кл}}$, $\lambda_{\text{кл}}$ — клею.

Результати розв'язання задачі про еквівалентну теплопровідність наведені у вигляді розподілу температур у багат шаровій стінці стаціонарної конструкції біологічного захисту (рис. 12, а). Розрахунки виконані з коефіцієнтом запасу 1,2...1,8 і показали, що товщина клейового шару не впливає на процеси теплопровідності; зі зменшенням товщини бетонного шару з 800 до 200 мм при перевезенні (зберіганні) вантажів з $Q = 2 \dots 8$ кВт на його зовнішній поверхні спостерігаються температури 38...73 °С, що відповідає Правилам МАГАТЕ. Для кришки як найбільш розігрітої частини моделі (див. рис. 12, б), де тепло підводиться з боку склоалюмінієвого шару $\delta = 50$ мм з $\lambda = 85,3$ Вт/(м·К), розв'язано стаціонарну задачу про зниження коефіцієнта тепловіддачі з поверхні кришки цистерни для РАВ, яку у постановочному плані представлено у вигляді двошарової горизонтальної пластини, де підведення тепла здійснюється знизу. На зовнішній та внутрішній поверхнях кришки відбувається конвективний теплообмін між РАВ ($Q = 2 \dots 20$ кВт) і повітрям на віддаленні, що визначає відведення тепла із зони максимального розігрівання. Припущено, що кількість тепла, яка проходить через кришку, складає 35% від сумарного відведення тепла у цистерні, температура повітря на віддаленні прийнята як 38 °С. Розподіл температур по шарах кришки визначається як

$$t_{\text{зов}} = t_{\text{вн}} - \frac{\dot{Q}}{F} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (14)$$

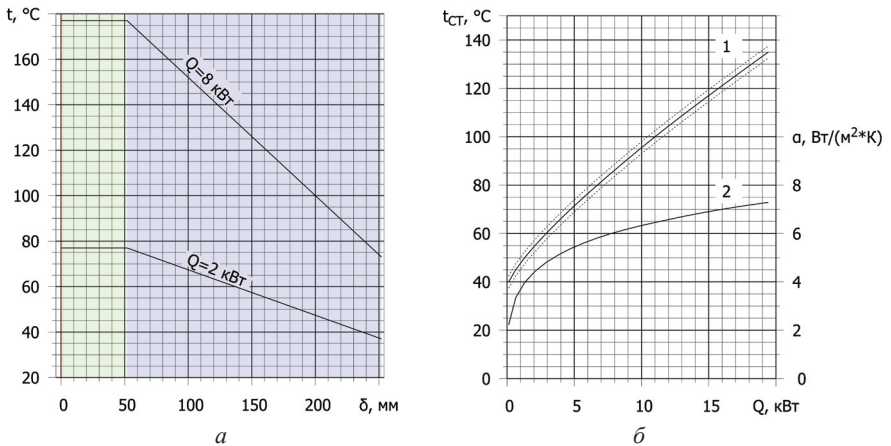


Рис. 12. Розподіл температур у залежності від потужності остаточного тепловиділення РАВ:

а — біля багат шарової стінки конструкції біологічного захисту; б — біля кришки бака; 1 — розподіл температури; 2 — розрахункові значення коефіцієнта тепловіддачі

де $t_{\text{зов}}$ — температура на зовнішній стінці кришки; $t_{\text{вн}}$ — температура на внутрішній стінці кришки; $\dot{Q}$ — кількість тепла, що проходить через кришку; F — площа кришки діаметром d ; δ_i , λ_i — відповідно товщини та коефіцієнти теплопровідності кожного із шарів кришки. Турбулентний режим руху повітря визначено за добутком критеріїв Грасгофа і Прандтля: $(Gr \cdot Pr)_{\text{ср}} > 10^9$.

Задача визначення температур зовнішнього шару кришки розв'язується методом послідовних наближень; одержані значення температур і коефіцієнта тепловіддачі підтверджують результати числового моделювання щодо обмежень за потужністю тепловиділення: для зберігання (транспортування) РАВ з $\dot{Q} \geq 8$ кВт на плавучих спорудах необхідно передбачити засоби примусового охолодження. Вплив зменшення товщини бетону на тепловий стан вантажної зони проаналізовано на прикладі моделювання теплових процесів для варіанту з вкладеними вертикальними цистернами. Внаслідок екзотермічних реакцій у повітрі можуть виникати скопчення шкідливих та небезпечних речовин, що збільшує ризик виникнення аварійних ситуацій. Проте така конструкція сприятиме відведенню тепла за рахунок потоків 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 (баком), що вказує на відсутність ризику виникнення пожежонебезпечної ситуації на плавучій споруді. Конструктивне рішення щодо зменшення товщини бетону з 800 до 200 мм сприятиме зниженню мас блока більше ніж у два рази, що дає змогу зберігати вантажі підвищеної щільності, зокрема рідкі, та підтверджено результатами аналітично-графічного оцінювання напружено-деформованого стану стінка–дно. Для захисту від корозійного пошкодження при заміні матеріалу цистерни з нержавіючої сталі на вуглецеву сталь (ВСт3) технологією нанесення метал-скляного шару на внутрішню поверхню цистерни передбачено додаткове просочення рідким склом. Запропоновані технологічні заходи також включають у себе нові способи виготовлення і ремонту деталей запірної арматури (клапанів, фланців, кранів) вантажних систем, які часто зношуються при зберіганні рідин та під час дезактивації. Розроблені рекомендації ґрунтовані на дослідженнях процесів структуроутворення та полягають у науково обґрунтованому виборі технологічних режимів формування методом гарячого пресування ($P = 0,7...1,2$ МПа при $t = 70...90^\circ\text{C}$ з подальшою ізотермічною витримкою при $t = 450...500^\circ\text{C}$) на зношеній сталевій поверхні (сталь 20, ГОСТ 1050-88) покриття з псевдосплавною структурою з порошків бронзи (Пр-Бр-9-2, ГОСТ 28377-89) та бабіту (Пр-Б83, ТУ 14-22-91-95) і передбачають застосування дрібноної стружки, що на 25...30% знижує собівартість.

У восьмому розділі «Економічна ефективність, рекомендації та впровадження результатів розробок» [4, 10] наводяться узагальнені результати досліджень з визначенням економічним ефектом та впровадженням у наукові, проєктні, виробничі установи та навчальний процес НУК, для чого проаналізовано інноваційну привабливість нових технічних рішень у проєктуванні і виготовленні з використанням розроблених матеріалів та покриттів елементів біологічного захисту. Розвиток та впровадження результатів узагальнено у вигляді

моделі, яка шляхом введення критеріїв інтелектуального капіталу з ефективним використанням нових конструктивних і технологічних рішень пов'язує економічну ефективність наукових результатів дисертаційного дослідження з навчальним процесом та визначним соціальним ефектом у галузі розвитку транспортних засобів для вивезення РАВ з місць їх накопичення у пункти переробки і захоронення. Розроблено технологічні рекомендації щодо формування елементів шаруватої конструкції з використанням склоалюмінієвих матеріалів та електродугових покриттів, а також ремонту деталей запірної арматури. За розрахунками техніко-економічних показників виявлено, що застосування у технологіях відходів виробництва (здрібненого бою скла, стружки) сприятиме скороченню вартісних показників на 20...25 %.

Надано техніко-економічне обґрунтування запропонованим в роботі конструктивним рішенням з постановкою оптимізаційної задачі за комплексним коефіцієнтом технологічності (рис. 13), який враховує мінімізацію маси, матеріальних витрат, раціональне використання матеріалів, трудомісткість виконання робіт і складність конструкцій. Одержані результати показали ефективність застосування як модульних, так і блочних елементів біологічного захисту. Оптимальною визнано панельну конструкцію модуля ($K_k = 6,0 \dots 6,2$), яка складається з бетонної плити товщиною 200 мм, облицьованої з одного боку сталевим листом (марка ВСт3, $\delta = 10$ мм) зі склоалюмінієвими плитками ($\delta = 10$ мм); серед метал-скляних покриттів перевага віддається композиції Св-08Г2С-ПСМ ($\delta = 1$ мм). Орієнтований економічний ефект для конструкцій, які використовують на судах, складає біля 150 тис. грн, на плавучих спорудах — біля 428 тис. грн.

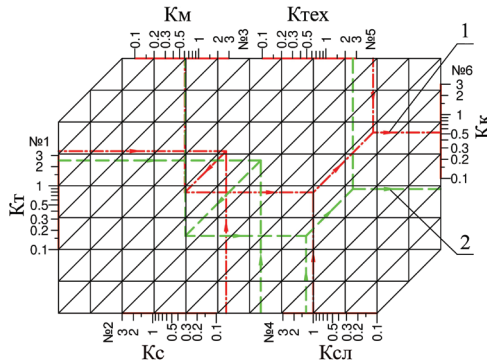


Рис. 13. Номограма для визначення комплексного коефіцієнта технологічності K_k з коефіцієнтами: K_m — матеріаломісткості; K_t — технологічності по трудомісткості; K_{cl} — складності; K_c — собівартості; K_{tex} — технологічності матеріалів із захисним шаром; 1 — покриття Св-08Г2С-ПСМ; 2 — склоалюмінієві плитки

У **додатках** (окрема частина) наведено допоміжні матеріали (нормативні документи, інструкції, методики, схеми випробувань, тексти програм тощо), акти впровадження, копії патентів, а також список публікацій здобувача.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано, теоретично обґрунтовано та досліджено вирішення **науково-технічної проблеми** розробки принципово нового наукового підходу до проектування елементів суден і плавучих споруд для радіоактивних вантажів, в основу якого покладено дотримання умов теплової безпеки та теорію захисту конструкцій на основі фізико-хімічних процесів створення нових композицій з полі- та ультрадисперсною структурою шляхом поєднання скляних мікросфер і порошків з металами методами спікання та електродугового напилення.

У роботі отримано наступні наукові і практичні результати, що характеризують наукову новизну і практичну цінність:

1. Підвищення техніко-економічних показників експлуатації спеціалізованих суден, призначених для транспортування радіоактивних вантажів, плавучих баз, сховищ для їх зберігання вимагає створення наукового підґрунтя до проектування елементів біологічного захисту, яке повинно містити нові знання та уявлення про теплові процеси у вантажній зоні при транспортуванні РАВ з остаточним тепловиділенням, про механізми послаблення інтенсивності іонізуючих випромінювань структурними елементами матеріалів конструкцій та їх хімічний склад, а також включати в себе науково-методичний апарат для прогнозування та оцінювання технічного стану. Теоретично обґрунтовано необхідність створення нових матеріалів і покриттів з поєднанням у складі скляних порошків і мікросфер з металами шляхом застосування високотемпературних технологій спікання та електродугового напилення.

2. В основу теорії захисту елементів суден та плавучих споруд, призначених для транспортування і зберігання радіоактивних вантажів, покладено наступні фізико-хімічні процеси та закономірності створення нових матеріалів і покриттів:

- вибір складів обумовлено принципом утворення ефекту багаторазового внутрішнього відбивання потоку випромінювань у середовище поглинання, що реалізовано через поєднання в одній композиції скляних і металевих компонентів шляхом спікання порожніх скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ з порошком або пудрою алюмінію (50 % об'ємн.) та електродугового напилення суцільнотягнутих дротів марок Св-АМг5 і Св-08Г2С з додаванням (в об'ємній кількості $10\pm 35\%$) скляних мікросфер і порошків, одержаних механічним здрібненням до дисперсності 10...90 мкм бою скла кришталевого посуду та рентгенівського обладнання, які за результатами МРСА відносяться до систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$;

- розроблено теоретичні і технологічні засади формування нових склоалюмінієвих матеріалів, що полягають в обґрунтуванні технологічних параметрів ($P = 0,7 \dots 1,2$ МПа при $t = 375 \dots 490$ °С з наступною ізотермічною витримкою при $t = 600 \dots 700$ °С), удосконаленні експериментальної установки для спікання та дослідження термодеоформаційних процесів, встановлених закономірностях, які ґрунтуються на заповненні під дією зовнішнього тиску і капілярного ефекту ультра- і мікропор, утворених у стінках ПСМ після вигорання силано-

вого апрету $\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$, та формуванні внаслідок ліквідаційних процесів локальних субмікрокристалічних областей з розміром ОКР до 90 нм, що узгоджується зі структурними перетвореннями у межах діаграм стану систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$;

- створено теоретичні передумови для технології формування по сталевій поверхні зі Ст3 електродугового метал-скляного покриття із заданими властивостями, які ґрунтуються на структурних особливостях скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ та порошоків стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ і включають у себе: визначення температурних полів на їх поверхні, результати розрахунків адгезійної ($\tau = 20 \dots 25$ МПа) та когезійної ($\sigma_n = 24 \dots 28$ МПа) міцності, уявлення про накопичення склофази і описаний через ефективні пружні характеристики взаємозв'язок між структурою покриттів та їх механічними властивостями.

3. Розроблено концептуальні положення підвищення комплексного захисту блоків і модулів суден та плавучих споруд для РАВ, які включають у себе:

- механізми послаблення γ - та рентгенівських випромінювань структурними елементами (порожніми скляними мікросферами, суцільними скляними частинками, ультра- і мікропорами, субструктурними елементами) розроблених матеріалів та покриттів, які на відміну від сучасних аналогів (синтактиків, САПів) завдяки ефекту «металізації» скляних порошоків і мікросфер характеризуються структурною стабільністю та підвищеними на 30...40 % значеннями масового коефіцієнта послаблення рентгенівських випромінювань. Нанесення електродугових покриттів $\delta = 1,5 \dots 2,0$ мм або формування на поверхні Ст3 склоалюмінієвого шару, товщина якого з урахуванням технологічних вимог до виготовлення плиток повинна бути більшою за 10 мм, забезпечує такий самий захист, як і облицювання свинцем товщиною 1 мм;

- вплив скляних включень на радіаційну стійкість в умовах γ -випромінювань Co^{60} електродугових покриттів ($\delta = 2$ мм), які при нанесенні на пластину Ст3 екранують її на 28...56 %, стримуючи радіаційне зміцнення та попереджаючи корозійне руйнування у 20 % розчинах HCl , H_2SO_4 , HNO_3 . Експериментально визначено, що нанесення метал-скляного покриття $\delta = 0,5$ мм з об'ємним вмістом ПСМ 10...40 % у 3...6 разів підвищує коефіцієнт розсіювання енергії пластини Ст3;

- руйнування в умовах термічних навантажень до 500 °С, процес якого описано через температурні деформації мікрооб'ємів за допомогою удосконаленої термомеханічної моделі, яка на відміну від існуючих моделей враховує вплив пористості (10...20 %) і дисперсність скляних включень (20...100 мкм) та визначає граничні умови експлуатації розроблених матеріалів і покриттів у складі конструкцій при транспортуванні та зберіганні РАВ з потужністю остаточного тепловиділення 2...20 кВт.

4. Розроблено нові науково-методичні засади оцінювання технічного стану композитних суднових конструкцій, які спрямовано на скорочення ремонтних робіт і надають можливості аналітичного прогнозування життєдіяльності елементів біологічного захисту на етапах їх проектування, виготовлення та експлуатації, які включають у себе:

- складання класифікації проектних, технологічних і експлуатаційних дефектів за уточненими показниками пошкоджуваності матеріалів конструкцій;

- проектування та реалізацію нової інформаційно-пошукової системи «*PROTECTIVE COATINGS DATA*»;

- встановлення за допомогою причинно-наслідкових діаграм і когнітивних моделей взаємного зв'язку між проектними, технологічними та експлуатаційними факторами.

5. Теоретично обґрунтовано та вирішено наступні конструкторські завдання:

- удосконалено конструкцію модуля біологічного захисту шляхом раціональної заміни традиційного двобічного облицювання листами нержавіючої (або плакованої) сталі бетонних панелей на облицювання їх лише з одного боку листом більш дешевої вуглецевої сталі (наприклад, ВСт3сп) з метал-скляним захисним шаром, що дає змогу більш ніж на 10 % знизити масу модуля, розширити тим самим асортимент вантажів та підвищити завантаженість судна; розроблено практичні рекомендації щодо виготовлення модуля і його монтажу на суховантажному судні;

- за допомогою числового моделювання досліджено напружено-деформований стан при короткочасному термічному навантаженні (до температур 300 і 570 °С) двошарових з'єднань Ст3 – метал-скляне покриття в умовах, наближених до екстремальних при поводженні з РАВ з питомою активністю до 0,4 Бк/кг і 40 ГБк/кг, що дає змогу прогнозувати граничні умови експлуатації під час їх транспортування і зберігання, а також при виникненні на судні пожежонебезпечних ситуацій.

6. Підвищення науково-технічного рівня проектування реалізовано шляхом удосконалення та розроблення нових теоретичних підходів:

- до проектування модулів біологічного захисту, який на відміну від традиційних підходів, що включають у себе розробку моделі функціонування судна з розв'язанням оптимізаційних задач, містить удосконалення конструкції та розробку нової інформаційної системи для його ефективного розміщення як великої вантажної одиниці на суховантажному судні разом з іншими вантажами за критеріями мінімізації сталійного часу;

- до елементів біологічного захисту плавучих споруд, призначених для зберігання радіоактивних вантажів з остаточною тепловиділенням, для чого вперше сформульовано і розв'язано у тривимірній спряженій постановці на прикладі суднової цистерни з багатошаровою стінкою стаціонарну задачу про тепловий стан, яка враховує потужність тепловиділення РАВ ($Q = 2 \dots 20$ кВт), теплопровідність, товщину кожного із шарів та дозволяє визначати розподіл полів температур і потоків повітря в умовах природної конвекції, що дає змогу моделювати проектну ситуацію з позицій обмежень за потужністю остаточного тепловиділення РАВ та обирати найбільш раціональне конструктивно-компонувальне рішення, для їх безпечного зберігання на плавучих спорудах.

7. Розроблено технологічні пропозиції та рекомендації, пов'язані з ремонтними і експлуатаційними заходами на суднах та плавучих спорудах і впровадженням розроблених конструктивних рішень з використанням нових матеріалів та покриттів:

- способу ремонту деталей суднової запірної арматури вантажних систем (клапанів, фланців, кранів тощо), який полягає у формуванні на попередньо вилудженій поверхні методом гарячого пресування ($P = 0,7 \dots 1,2$ МПа) при температурі $70 \dots 90$ °С з подальшою ізотермічною витримкою при $450 \dots 500$ °С суміші порошків бронзи (Пр-Бр-9-2) та бабіту (Пр-Б83), де замість порошку можна застосовувати здрібнену стружку бабіту, що приблизно на $25 \dots 30$ % знижує собівартість ремонту та сприяє утилізації виробничих відходів;

- щодо виготовлення склоалюмінієвих плиток та формування за їх участю з використанням запропонованої клейової композиції шаруватих панелей модулів біологічного захисту для суховантажних суден та кришок баків з РАВ для плавучих споруд;

- щодо нанесення метал-скляних електродугових покриттів на сталеві поверхні панелей модулів для суховантажних суден та внутрішні поверхні цистерн для рідких РАВ, що зберігаються на плавучих спорудах;

- техніко-економічного обґрунтування з постановкою та вирішенням задачі щодо вибору оптимального конструктивного рішення з раціональним вибором матеріалів за комплексним коефіцієнтом технологічності: одержані результати свідчать про доцільність застосування усіх розглянутих конструктивних варіантів, проте оптимальним, що відповідає умовам мінімізації маси, матеріальних витрат, трудомісткості, складності конструкцій і раціонального використання матеріалів, слід вважати панельну конструкцію модуля біологічного захисту, яка складається з бетонної плити товщиною 200 мм, облицьованої з одного боку листом вуглецевої сталі $\delta = 10$ мм зі склоалюмінієвими плитками ($\delta = 10$ мм); серед метал-скляних покриттів перевага віддається композиції Св-08Г2С–ПСМ ($\delta = 1$ мм).

8. Проаналізовано інноваційну привабливість нових технічних рішень у проектуванні та виготовленні з використанням нових матеріалів і покриттів елементів суден та плавучих споруд, яку описано за допомогою моделі, що враховує індекс рентабельності інтелектуального капіталу та соціальний ефект від розвитку транспортних засобів для вивезення РАВ з місць їх накопичення у пункти переробки і захоронення. Результати роботи впроваджено у наукові, проектні і виробничі установи та використані у навчальному процесі кафедр Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у іноземних і фахових виданнях за спеціальністю 05.08.03

1. Казимиренко, Ю. А. Разработка научных основ проектирования и защиты элементов судов и плавучих сооружений для радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. — Baki : Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, 2018. — № 2. — С. 19–24 (*іноземне фахове видання*).

2. Казимиренко, Ю.О. Теоретичне обґрунтування підвищення техніко-економічних і експлуатаційних показників елементів плавучих споруд для радіоактивних вантажів / Ю.О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. — 2018. — № 8 (36), vol. 1. — P. 38–45 (*іноземне видання, НМБ eLIBRARY*).

3. Казимиренко, Ю. О. Аналітична модель функціонування судна на основі побудови інформаційної системи завантаженості / Ю. А. Казимиренко // ScienceRise : науч. журн. — Х. : Технологический центр, 2018. — № 1 (42). — С. 43–49 (*НМБ: РИНЦ, ResearchBib, CrossRef, WorldCAD, DOAJ, BASE, DRJI та ін*).

4. Дрозд, О.В. Вплив управління загальноосвітнім процесом на критерії інноваційної привабливості суден для радіоактивних вантажів / О.В. Дрозд, О.С. Рижков, Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. — 2018. — № 1 (29), vol. 1. — P. 59–65 (*іноземне видання, НМБ eLIBRARY*) — *авторський вклад: розроблення аналітичної моделі інноваційної привабливості нових технічних рішень*.

5. Казимиренко, Ю.А. Перспективные материалы, способы и технологические направления формирования конструкций биологической защиты судов и плавучих сооружений для радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. — Baki : Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, 2017. — № 2. — С. 39–44 (*іноземне фахове видання*).

6. Казимиренко, Ю.О. Формування клейового з'єднання для виготовлення багатопарових конструкцій суден / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. — 2016. — № 3 (7), vol. 2. — P. 20–24 (*іноземне видання, НМБ eLIBRARY*).

7. 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 (*іноземне фахове видання*).

8. 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 (*іноземне видання, НМБ eLIBRARY*).

9. Казимиренко, Ю. О. Корозійний 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 (*іноземне видання, НМБ eLIBRARY*).

10. 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 (*фахове видання України, НМБ: Index Copernicus, BASE, РИНЦ*).

ResearchBib, DOAJ, WorldCAD, EBSC та ін.) — авторський вклад: постановка завдання, розрахунок критеріїв технологічності, узагальнення результатів досліджень.

11. Казимиренко, Ю. А. Информационная поддержка оценки технического состояния конструкций судов и плавучих сооружений / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова // Управління розвитком складних систем : зб. наук. пр. — К. : КНУБА, 2015. — № 12. — С. 111–117 (*фахові видання України, НМБ BASE, Index Copernicus, Google Scholar*) — *авторський вклад: постановка завдання, розроблення структурної інформаційної моделі оцінювання технічного стану.*

12. Казимиренко, Ю. А. Оценка технического состояния композитных конструкций судов с использованием информационной обработки данных / Ю. А. Казимиренко // ScienceRise : науч. журн. — Х. : Технологический центр, 2015. — № 8(18). — С. 31–37 (*НМБ: РИНЦ, ResearchBib, CrossRef, WorldCAD, DOAJ, BASE, DRJI та ін.*).

13. Казимиренко, Ю. О. Закономірності формування покриття з порошків бронзи та бабіту методом гарячого пресування / **Ю. О. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедева // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. — Х. : Технологический центр, 2015. — № 5/7 (25). — С. 24–27 (*фахові видання України, НМБ: Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, DRIVER, BASE, РИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCAD, EBSCD*) — *авторський вклад: постановка завдання, розроблення устаткування, закономірності та узагальнення результатів досліджень.*

14. Казимиренко, Ю. А. Формирование конструкций плавучих композитных сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. — Х. : Технологический центр, 2014. — № 6/5 (20). — С. 7–9 (*НМБ: Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, DRIVER, BASE, РИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCAD, EBSCD*).

15. Фарионова, Т. А. Механизмы управления свойствами защитных конструкций технических средств для перевозки опасных грузов / Т. А. Фарионова, **Ю. А. Казимиренко** // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. — Х. : Технологический центр, 2012. — № 1/11 (55). — С. 35–37 (*фахові видання України, входить до НМБ РИНЦ, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, EBSCD, DOAJ, Google Scholar*) — *авторський вклад: визначення основних етапів проектування захисних конструкцій та впливу структурних характеристик матеріалів і покриттів на експлуатаційні властивості.*

16. Возный, А. М. Применение когнитивного моделирования при проектировании конструкций технических средств для хранения радиоактивных веществ / А. М. Возный, **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова // Управління розвитком складних систем : зб. наук. пр. — К. : КНУБА, 2012. — № 10. — С. 37–41 (*фахові видання України*) — *авторський вклад: складання моделі задачі проектування конструкцій, вибір інтервалів варіювання, попарне порівняння критеріїв.*

17. Проектная оценка технического состояния судовых конструкций с использованием информационно-поисковых систем / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова, С. А. Казимиренко и др. // Вісн. НТУ «ХПІ». — Х. : НТУ «ХПІ», 2014. — № 3 (1046). — С. 60–64 (*фахове видання України*) — **авторський вклад: визначення механізмів проектної оцінки технічного стану конструкцій, участь у розробці інформаційно-пошукової системи.**

18. Фарионова, Т. А. Выбор состава композиционных материалов и покрытий технических средств для перевозки опасных грузов на основе экспертных оценок / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // Вісн. НУК. — Миколаїв : НУК, 2011. — С. 155–164 (*електрон. фахове вид. України, входить до НМБ: WorldCAD, Bielefeld Academic*) — **авторський вклад: вибір та обґрунтування хімічного складу композиційних матеріалів і покриттів, дослідження структури та властивостей, визначення граничних умов експлуатації.**

19. Казимиренко, Ю. А. Исследование процесса получения псевдосплава из порошков бронзы и баббита / Ю. А. Казимиренко // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2005. — № 5 (404). — С. 29–33 (*фахове видання України*).

Патенти

20. Пат. 111654 Україна, МПК В63В3/00. Спосіб захисту конструкцій суден і плавучих споруд від дії іонізуючих випромінювань / Ю. О. Казимиренко ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. — № а201409822 ; заявл. 10.02.2015 ; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

Статті у наукових і фахових виданнях за спеціальністю 05.17.11

21. Казимиренко, Ю. О. Порошки систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$: переробка відходів і процеси розм'якшення / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. — 2018. — № 7 (35), vol. 2. — Р. 21–30 (*іноземне видання, НМБ eLIBRARY*).

22. Казимиренко, Ю. О. Вплив високотемпературних технологій на структуру порожніх мікросфер / Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. — 2018. — № 5 (33), vol. 1. — Р. 41–49 (*іноземне видання, НМБ eLIBRARY*) — **авторський вклад: дослідження структури ПСМ та процесів структуроутворення покриттів на основі $\text{Cv-08G}2\text{C}$.**

23. Kazymyrenko, Y. The Thermomechanical Processes in Metal-Glass Coating of Vessel Constructions and Floating Facilities for Radioactive Cargo / Y. Kazymyrenko // The advanced science journal. — 2016. — Iss. 2. — Р. 38–44 (*іноземне видання, входить до НМБ: Index Copernicus, CrossRef, Google Scholar, WorldCAD, CNKI Scholar, РИНЦ та ін.*).

24. Kazymyrenko, Y. The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials / Y. Kazymyrenko // The advanced science journal. — 2016. — Iss. 1. — Р. 90–94 (*іноземне видання, НМБ: Index Copernicus, CrossRef, Google Scholar та ін.*).

25. Казимиренко, Ю. А. Влияние структурной неоднородности полых стеклянных микросфер на физико-химические процессы формирования материалов и покрытий / Ю. А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. — Х. : Технологический центр, 2015. — № 6/7 (26). — С. 20–25 (*фахове видання України, входить до НМБ: Index Copernicus, Periodical Directory, DRIVER, BASE, РИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCAD, EBSCD*).

26. Kazimirenko, Y.A. Radiation Resistange of Metal-Glass Coatings for Floating Composite Structures / Y.A. Kazimirenko, V. V. Schlapatskaya // Shipbulding & marine infrastructure. — 2015. — № 1 (3). — P. 111–121 (*фахове видання України, НМБ eLIBRARY*) — *авторський вклад: дослідження структури та властивостей покриттів, узагальнення результатів.*

27. Kazymyrenko, Y. Patterns and Mechanisms of Interaction of Radioactive Cargo Radiation with Metal-Glass Layer of Watercrats Structure / Y. Kazymyrenko // The advanced science journal. — 2014. — Iss. 12. — P. 45–48 (*іноземне видання, НМБ: Index Copernicus, CrossRef, Google Scholar, WorldCAD, CNKI Scholar, РИНЦ та ін.*).

28. Исследование демпфирующих свойств электродуговых покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами / Ю. А. Казимиренко, Н.Ю. Лебедева, А.А. Карпеченко и др. // 36. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2013. — № 1 (446). — С. 56–59 (*фахове видання України, НМБ: Index Copernicus, WorldCAD, BASE, CrossRef*) — *авторський вклад: вибір складу, дослідження структури, визначення впливу об'ємного вмісту ПСМ на коефіцієнт розсіювання енергії.*

29. Казимиренко, Ю. А. Закономерности формирования металлостеклянных материалов и покрытий с повышенными рентгенозащитными свойствами / Ю. А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. — Х. : Технологический центр, 2013. — № 6/2 (14). — С. 4–8 (*НМБ: Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, DRIVER, BASE, РИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCAD, EBSCD*).

30. Казимиренко, Ю. А. Управление качеством в проектах создания радиационно-стойких композиционных материалов и покрытий / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. — Х. : Технологический центр, 2013. — № 1/10 (61). — С. 171–179 (*фахове видання України, входить до НМБ: РИНЦ, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, EBSCD, DOAJ, Google Scholar*) — *авторський вклад: постановка завдання, вибір критеріїв якості, узагальнення результатів.*

31. Фарионова, Т. А. Когнитивное моделирование в проектировании композиционных материалов и покрытий / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. — Х. : Технологический центр, 2011. — № 1/6 (49). — С. 36–39 (*фахове видання України, входить до НМБ РИНЦ, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, EBSCD, DOAJ, Google Scholar*) — *авторський вклад: складання моделі задачі проектування радіаційностійких композиційних матеріалів і покриттів.*

32. Казимиренко, Ю. О. Перспективи застосування металоскляних покриттів з підвищеними рентгенозахисними властивостями для конструкцій технічних засобів перевезення радіоактивних речовин / Ю. О. Казимиренко // Вісн. ЛДУ БЖД. — Л. : ЛДУ БЖД, 2013. — № 8. — С. 134–140 (*фахове видання України*).

33. Формирование электродуговых покрытий с повышенной прочностью, демпфирующей способностью и коэффициентом поглощения излучений / Ю. А. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева, А. А. Карпеченко и др. // Наукові нотатки : міжвуз. зб. — Луцьк : ЛНТУ, 2013. — № 41, ч. 1. — С. 117–121 (*фахове видання України*) — *авторський вклад: встановлення взаємозв'язку між структурою і рентгенозахисними властивостями покриттів.*

34. Формирование ультрадисперсной структуры в композиционных электродуговых покрытиях, наполненных полыми стеклянными микросферами / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов и др. // Вісн. НУК. — Миколаїв : НУК, 2013. — С. 109–114 (*електрон. фахове видання України, НМБ: WorldCAD, BieleFeld Academic*) — *авторський вклад: дослідження особливостей структури і поверхні поділу фаз у электродугових покриттях.*

35. Казимиренко, Ю. А. Формирование электродуговых покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2009. — № 1 (424). — С. 81–86 (*фахове видання України*) — *авторський вклад: вибір складу та дослідження особливостей структури покриттів.*

36. Фарионова, Т. А. Применение метода анализа иерархий в задачах проектирования композиционных материалов / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // Вестн. ХНТУ. — Херсон, 2009. — № 34. — С. 373–377 (*фахове видання України*) — *авторський вклад: одержання експериментальних зразків, вибір критеріїв оцінювання захисних властивостей.*

37. Исследование ослабления ионизирующего излучения композиционными материалами / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко, С. И. Шкурат и др. // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2009. — № 2 (425). — С. 105–109 (*фахове видання України*) — *авторський вклад: одержання експериментальних зразків, розрахунки рентгенозахисних характеристик, узагальнення результатів.*

38. Казимиренко, Ю. А. Структурные особенности формирования металлостеклянных композиционных материалов на основе полых стеклянных микросфер / Ю. А. Казимиренко, Г. В. Волков // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2006. — № 6 (411). — С. 81–86 (*фахове видання України*) — *авторський вклад: розроблення способу одержання матеріалів, дослідження усадочних процесів та особливостей мікроструктури.*

39. Казимиренко, Ю. А. Новые металлостеклянные композиционные материалы на основе полых стеклянных микросфер / Ю. А. Казимиренко // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2005. — № 2 (401). — С. 40–44 (*фахове видання України*).

Патенти на винахід

40. Пат. 74476 Україна, МПК (2004) C22C1/08, B22F3/16. Спосіб одержання пористого матеріалу / Ю. О. Казимиренко. — № а2004032111 ; заявл. 23.03.2004 ; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.

41. Пат. 95678 Україна, МПК⁷ C21D 8/00, C22F 1/00. Спосіб деформаційно-термічної обробки металів та сплавів / О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, Н. Ю. Лебедєва, Ю. О. Казимиренко та ін. — Заявл. 01.03.2010 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14 — **авторський вклад**: виявлення закономірностей формування нанорозмірних ефектів при ПТО, якій у подальшому апробовано на метал-скляних електродугових покриттях.

Патенти на корисну модель

42. Пат. 90580 Україна, МПК C23C4/00 (2014), C 4/04 (2006). Спосіб нанесення електродугових покриттів / **Ю. О. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедєва, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. — № 056162013 ; заявл. 30.04.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11 — **авторський вклад**: вибір складу та встановлення впливу об'ємного вмісту ПСМ на коефіцієнт розсіювання енергії.

43. Пат. 97311 Україна, МПК B22F3/14. Спосіб формування порошкового покриття на поверхні виробу / Ю. О. Казимиренко ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. — № 2014819 ; заявл. 08.09.2014 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.

44. Пат. 99331 Україна, МПК B22F3/14. Установка для виготовлення порошкових виробів / Ю. О. Казимиренко ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. — № 201414197 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10.

Опубліковані праці апробаційного характеру

45. Казимиренко, Ю. О. Вплив температурних факторів на структурний стан дисперсних скляних наповнювачів систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ / Ю. О. Казимиренко // Матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв : НУК, 2017. — С. 137–139 (очна участь).

46. Казимиренко, Ю. О. Принципи розробки багатофункціональної установки для термдеформаційних способів формування / Ю. О. Казимиренко // Матеріали VII міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв : НУК, 2016. — С. 118–120 (очна участь).

47. Казимиренко, Ю. А. Применение экспертных методов для оценки толщины защитного слоя композитных конструкций судов для перевозки радиоактивных грузов / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова // Матеріали VI міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв : НУК, 2015. — С. 155–157 — **авторський вклад**: встановлення взаємозв'язку між проектними факторами (очна участь).

48. Казимиренко, Ю. А. Закономерности, процессы и механизмы взаимодействия ионизирующих излучений с металлостеклянными материалами и покрытиями / Ю. А. Казимиренко // Матеріали V міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв : НУК, 2014. — С. 175–178 (очна участь).

49. Казимиренко, Ю. А. Исследование возможности повышения демпфирующих свойств судовых конструкций / **Ю. А. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедева // Матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв : НУК, 2013. — С. 144–146 — **авторський вклад: вибір складу метал-скляних електродугових покриттів, аналіз взаємозв'язку між структурою матеріалів і властивостями конструкцій** (очна участь).

50. Коррозионная стойкость композиционных покрытий в агрессивных средах / **Ю. А. Казимиренко**, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов и др. // Матеріали III міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв : НУК, 2012. — С. 200–202 — **авторський вклад: дослідження механізмів руйнування зразків опромінених метал-скляних покриттів у розчинах кислот** (очна участь).

51. Kazimirenko, J. Innovative projects of radioactive substances transportation and storage hardware creation / **J. Kazimirenko**, T. Farionova, I. Mihelev // Матеріали II міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв, 2011. — С. 576–577 — **авторський вклад: аналіз сучасних тенденцій транспортування РАВ з урахуванням їх властивостей** (очна участь).

52. Казимиренко, Ю. А. Композиционные материалы для технических и транспортных средств перевозки и хранения опасных грузов / Ю. А. Казимиренко // Матеріали I міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв, 2010. — С. 142–143 (очна участь).

53. Казимиренко, Ю. О. Науково-методичні підходи до теоретичних і експериментальних досліджень при проектуванні захисних конструкцій плавучих об'єктів для зберігання радіоактивних речовин / Ю. О. Казимиренко // Матеріали VI всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Підводна техніка і технологія». У 2 ч. — Миколаїв : НУК, 2016. — Ч. 1. — С. 18–21 (очна участь, пленарне засідання).

54. Казимиренко, Ю. А. Тепловое состояние грузовой зоны плавучих композитных сооружений, предназначенных для хранения радиоактивных веществ / Ю. А. Казимиренко // Матеріали V всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Підводна техніка і технологія». — Миколаїв : НУК, 2015. — С. 31–35 (очна участь).

55. Казимиренко, Ю. А. Проектирование и формирование композитных конструкций плавучих сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Матеріали IV всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Підводна техніка і технологія». — Миколаїв : НУК, 2014. — С. 22–25 (очна участь).

56. Казимиренко, Ю. О. Вплив енергетичних параметрів радіоактивних вантажів на проектування суднових конструкцій біологічного захисту / Ю. О. Казимиренко // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Сучасні технології проектування, побудови та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». — Миколаїв : НУК, 2017. — С. 62–64 (очна участь).

57. Казимиренко, Ю. А. Прогнозирование тепловой безопасности композитных плавучих сооружений, предназначенных для транспортировки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Сучасні технології проектування, побудови та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». — Миколаїв : НУК, 2016. — С. 32–35 (очна участь).

58. Применение методов системного анализа и когнитивного моделирования в задачах перевозки опасных грузов водным транспортом / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова, С. А. Казимиренко и др. // Материалы IV междунар. науч.-практ. конф. «Современные порты — проблемы и решения». — О., 2012. — С. 238–240 — ***авторський вклад:** формулювання сюрвейерських задач при транспортуванні небезпечних вантажів водним транспортом* (заочна участь).

59. Модели и механизмы управления проектами морских перевозок опасных грузов / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова, С. А. Казимиренко и др. // Материалы науч.-практ. конф. «Проблемы развития транспортной логистики». — О. : ОНМУ, 2012. — С. 105–108 — ***авторський вклад:** узагальнення результатів досліджень* (заочна участь).

60. Казимиренко, Ю. А. Применение причинно-следственных диаграмм на этапах технологической подготовки судовых композитных конструкций / Ю. А. Казимиренко // Матеріали XI міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». — Миколаїв : НУК, 2016. — С. 68–70 (очна участь).

61. Казимиренко, Ю. А. Информационные технологии в проектировании радиационно-стойких материалов и конструкций / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова // Матеріали X міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». — Миколаїв : НУК, 2015. — С. 51–52 — ***авторський вклад:** постановка задачі дослідження, розробка структурної моделі інформаційної підтримки* (заочна участь).

62. Фарионова, Т. А. Системный подход к управлению качеством на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации судовых конструкций / Т. А. Фарионова, **Ю. А. Казимиренко** // Матеріали IX міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». — Миколаїв : НУК, 2014. — С. 301–304 — ***авторський вклад:** визначення критеріїв якості радіаційно стійких композиційних матеріалів* (очна участь).

63. Казимиренко, Ю. А. Управление качеством новых композиционных материалов и покрытий / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова, И. Л. Михелев // Матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». — Миколаїв, 2011. — С. 130–132 (очна участь).

64. Возный, А. М. Применение когнитивного подхода для проектирования конструкций из радиационно-стойких композиционных материалов / А. М. Возный, **Ю. А. Казимиренко**, **Т. А. Фарионова** // Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ю-терні науки: освіта, наука, практика». — Миколаїв : НУК, 2012. — С. 49–52 — **авторський вклад: складання моделі задачі, аналіз взаємного впливу факторів** (очна участь).

65. Казимиренко, Ю. А. Информационная поддержка принятия решений на этапе эксплуатации судовых конструкций / Ю. А. Казимиренко // Матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». — О. : ОНМУ, 2017. — С. 254–257 (очна участь).

66. Казимиренко, Ю. О. Застосування інформаційних систем в задачах оцінювання експлуатаційних дефектів композиційних конструкцій суден / Ю. О. Казимиренко // Матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». — О. : ОНМУ, 2016. — С. 247–250 (очна участь).

67. Фарионова, Т. А. Информационно-поисковые системы для проектирования и оценки технического состояния композитных конструкций судов / Т. А. Фарионова, **Ю. А. Казимиренко** // Матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». — О. : ОНМУ, 2015. — С. 31–35 — **авторський вклад: розроблення інформаційної моделі оцінювання технічного стану** (очна участь).

68. Kazimirenko, Y. A. The use new informational-search systems for assessing technical conditions of ship constructions / **Y. A. Kazimirenko**, **T. A. Farionova** // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». — О. : ОНМУ, 2014. — С. 54–56 — **авторський вклад: дослідження механізмів проектної оцінки технічного стану конструкцій суден** (очна участь).

69. Фарионова, Т. А. Применение когнитивного моделирования в задачах проектирования новых материалов / **Т. А. Фарионова**, **Ю. А. Казимиренко** // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». — О. : ОНМУ, 2013. — С. 53–55 — **авторський вклад: формулювання задачі проектування нових матеріалів, вибір критеріїв когнітивного моделювання** (очна участь).

70. Казимиренко, Ю. А. Формирование изделий судовой арматуры методом горячего прессования / **Ю. А. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедева // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф., присвяч. 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова ; III всеукр. наук.-техн. конф. студ., асп. і молодих науковців. — Миколаїв : НУК, 2014. — С. 46–48 — **авторський вклад: розроблення технології формування покриття для ремонту суднової запірної арматури** (очна участь).

71. Термостойкость облученных металлостеклянных покрытий / **Ю. А. Казимиренко**, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов и др. // Матеріали II всеукр. наук.-техн. конф. студ., асп. і молодих науковців «Зварювання, споріднені процеси і технології». — Миколаїв : НУК, 2012. — С. 82–83 — **авторський вклад: до-**

слідження механізмів руйнування опромінених покриттів при термоциклічних навантаженнях (очна участь).

72. Казимиренко, Ю. А. Применение отходов стекольного производства в процессах формирования покрытий для защиты от ионизирующих излучений / Ю. А. Казимиренко // Материалы XXX междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 7–10 июня 2010 г., Ялта. — К., 2010. — С. 429–431 (очна участь).

73. Композиционные материалы для защиты от ионизирующих излучений / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко, С. И. Шкурат и др. // Материалы XXIX междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 1–5 июня 2009 г., Ялта. — К., 2009. — С. 339–341 — **авторський вклад: систематизація та узагальнення експериментальних результатів досліджень рентгенозахисних властивостей** (очна участь).

74. Казимиренко, Ю. А. Влияние радиационного облучения на фазовый состав стеклокомпозитов / Ю. А. Казимиренко, А. А. Жданов // Материалы XXIX междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 30 мая–3 июня 2007 г., Ялта. — К., 2007. — С. 327 — **авторський вклад: аналіз зміни структури у опромінених матеріалах** (очна участь).

75. Казимиренко, Ю. О. Прогнозування напруженого стану двошарових захисних конструкцій в умовах короточасних температурних навантажень / Ю. О. Казимиренко, І. А. Колесар // Матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. «Актуальні проблеми інженерної механіки». — О., 2017. — С. 48–51 — **авторський вклад: постановка задачі досліджень та визначення умов руйнування конструкцій** (очна участь).

76. Казимиренко, Ю. О. Моделювання термомеханічних процесів у опромінених композиційних покриттях захисних конструкцій суден і плавучих споруд / Ю. О. Казимиренко // Материалы III междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы инженерной механики». — О., 2016. — С. 84–87 (очна участь).

77. Казимиренко, Ю. О. Металоскляні матеріали і покриття захисних конструкцій суден і плавучих споруд, призначених для перевезення та зберігання радіоактивних вантажів / Ю. О. Казимиренко // Материалы IX междунар. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий». — К. : Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, 2016. — С. 19 (пленарна доповідь).

78. Казимиренко, Ю. О. Структурна неоднорідність порожніх скляних мікросфер натрійсилікатного складу / Ю. О. Казимиренко // Матеріали всеукр. конф. молодих науковців «Актуальні проблеми сучасної хімії». — Миколаїв : НУК, 2017. — С. 28–30 (пленарна доповідь).

Публікації, які додатково відображають наукові результати

79. Інженерне матеріалознавство : підручник для студ. вищ. навч. закл. (з грифом МОНУ) / О. М. Дубовий, **Ю. О. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедева та ін. — Миколаїв : НУК, 2009. — 444 с. — **авторський вклад:** частина 4: «Неметалеві матеріали», р. 12 і 13 в ч. 1.

80. Казимиренко, Ю. О. Методичні вказівки до виконання курсової і лабораторних робіт з дисципліни «Дисперсні матеріали та композити» / **Ю. О. Казимиренко**, А. А. Карпеченко. — Миколаїв : НУК, 2018. — 98 с. — **авторський вклад:** постановка лабораторних робіт з дослідження неметалічних порошків, процесів їх пресування та спікання.

81. Казимиренко, Ю. А. Инновационные проекты защиты технических средств перевозки и хранения радиоактивных веществ / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова, С. О. Слободян // Матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». — Миколаїв : НУК, 2010. — С. 117–120 — **авторський вклад:** визначення етапів комплексного захисту конструкцій технічних засобів (очна участь).

АНОТАЦІЯ

Казимиренко Ю. О. Наукові основи проектування та підвищення захисту метал-скляними матеріалами елементів суден для радіоактивних вантажів. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями 05.08.03 — конструювання та будування суден і 05.17.11 — технологія тугоплавких неметалічних матеріалів. — Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2019 р.

Запропоновано, теоретично обгрунтовано та досліджено вирішення **науково-технічної проблеми** розробки принципово нового наукового підходу до проектування елементів суден і плавучих споруд для радіоактивних вантажів (РАВ), в основу якого покладено дотримання умов теплової безпеки та теорію захисту конструкцій на основі фізико-хімічних процесів створення нових композицій з полі- та ультрадисперсною структурою шляхом поєднання скляних мікросфер і порошків з металами методами спікання та електродугового напилення. Теоретично обгрунтовано та експериментально підтверджено можливість спікання порожніх скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ з порошками алюмінію. Наукові основи створення нових композицій ґрунтуються на встановлених закономірностях перебування скляних мікросфер і порошків систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ у аморфному та кристалічному станах з наступним формуванням полі- та ультрадисперсної структури та ефектом «металізації» скляних включень, що сприятиме підвищенню рентгенозахисних властивостей. Досліджено вплив скляних включень на радіаційну стійкість в умовах γ -випромінювань Co^{60} , міцнісні, теплофізичні, демпфірувальні властивості електродугових покриттів із Св-08Г2С і Св-АМг5,

що є підґрунтям для концептуальних положень підвищення комплексного захисту блоків і модулів суден та плавучих споруд для РАВ. Розвинуто метод оцінювання технічного стану суднових композитних конструкцій: поглиблено систему показників якості, розроблено нову інформаційно-пошукову систему та встановлено взаємозв'язок між проектними, технологічними і експлуатаційними факторами. За допомогою застосування розроблених матеріалів та покриттів удосконалено конструкцію модуля біологічного захисту, що дає змогу на 10 % знизити його масу; досліджено напружено-деформований стан шаруватих панелей в умовах короткочасних температурних навантажень у випадках аварійних ситуацій транспортування середньо- і високоактивних РАВ; розроблено нову аналітичну модель функціонування судна з побудовою інформаційної системи завантаженості. Науково обґрунтовано та запропоновано новий підхід до проектування елементів біологічного захисту плавучих споруд, для чого вперше сформульовано і розв'язано у тривимірній спряженій постановці на прикладі суднової цистерни з багат шаровою стінкою стаціонарну задачу про тепловий стан у вантажній зоні, що дає змогу отримувати інформацію про розподіл температур та циркуляцію повітря і обирати раціональну конструкцію блоків за обмеженнями потужності остаточного тепловиділення РАВ. Розроблено технологічні пропозиції щодо ремонтних та експлуатаційних заходів, впровадження конструктивних рішень з використанням нових матеріалів і покриттів. Проаналізовано інноваційну привабливість та визначено економічну ефективність розробок.

Ключові слова: елементи суден і плавучих споруд, радіоактивні вантажі, проектування, конструювання, оцінювання технічного стану, технологія, скляні порошки і мікросфери, аморфний і кристалічний стан, спікання, метал-скляні матеріали і покриття, електродугове напильнення.

АННОТАЦІЯ

Казимиренко Ю. А. Научные основы проектирования и повышения защиты металл-стеклянными материалами элементов судов для радиоактивных грузов. — Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.08.03 — конструирование и постройка судов; 05.17.11 — технология тугоплавких неметаллических материалов. — Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2019 г.

Предложено, теоретически обосновано и исследовано решение **научно-технической проблемы** разработки принципиально нового научного подхода к проектированию элементов судов и плавучих сооружений для радиоактивных грузов (РАГ), в основу которого положено соблюдение условий тепловой безопасности и теория защиты конструкций на основе физико-химических процессов создания новых композиций с поли- и ультрадисперсной структурой путем соединения стеклянных микросфер и порошков методами спекания и электродугового напильнения. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность спекания полых стеклянных микросфер системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ с порошками алюминия. Научные основы создания новых

композиций основаны на установленных закономерностях пребывания стеклянных микросфер и порошков систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ в аморфном и кристаллическом состоянии с последующим формированием поли- и ультрадисперсной структуры с эффектом «металлизации» стеклянных включений, способствующим повышению рентгенозащитных свойств. Исследовано влияние стеклянных включений на радиационную стойкость в условиях γ -излучений Co^{60} , прочностные, теплофизические и демпфирующие свойства электродуговых покрытий из Св-08Г2С и Св-АМг5, что положено в основу концептуальных положений повышения комплексной защиты блоков, модулей судов и плавучих сооружений для РАГ. Получил развитие метод оценки технического состояния судовых композитных конструкций: углублена система показателей качества, разработана новая информационно-поисковая система, установлена взаимосвязь между проектными, технологическими и эксплуатационными факторами. С помощью разработанных материалов и покрытий усовершенствована конструкция модуля биологической защиты, что позволяет на 10 % снизить его массу; исследовано напряженно-деформированное состояние слоистых панелей в условиях кратковременных температурных напряжений в случаях аварийных ситуаций транспортирования средне- и высокоактивных РАГ; разработана новая аналитическая модель функционирования судна на основе информационной системы загруженности. Научно обоснован и предложен новый подход к проектированию элементов биологической защиты плавучих сооружений, для чего впервые сформулирована и решена в трехмерной сопряженной постановке на примере судовой цистерны с многослойной стенкой стационарная задача о тепловом состоянии грузовой зоны, что дает возможность получать информацию о распределении температур и циркуляции воздуха, выбирать рациональную конструкцию блоков на основе ограничений остаточного тепловыделения РАГ. Разработаны технологические рекомендации по ремонтным и эксплуатационным мероприятиям, внедрению конструкторских решений с применением новых материалов и покрытий. Проанализирована инновационная привлекательность и определена экономическая эффективность разработок.

Ключевые слова: элементы судов, плавучие сооружения, радиоактивные грузы, проектирование, конструирование, технология, оценка технического состояния, стеклянные порошки и микросферы, аморфное и кристаллическое состояние, спекание, металл-стеклянные материалы и покрытия.

ABSTRACT

Kazymyrenko Y. A. Scientific foundations of the design and the enhancement of protection level of radioactive cargoes vessels' elements by metal-glass materials. — Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

The dissertation for a scientific degree competition of doctor of technical sciences in specialties 05.08.03 — design and construction of vessels; 05.17.11 — technology of refractory non-metallic materials. — Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 2019.

The solution of the **scientific and technical problem** of development of fundamentally new scientific approach to the design of elements of vessels and floating facilities for radioactive cargoes has been proposed, theoretically substantiated and researched. It is based on compliance with conditions of thermal safety and the theory of protection of constructions on the basis of physical and chemical processes of creation of new compositions with poly- and ultra-dispersed structure by combining glass microspheres and metal powders with the use of sintering and electric-arc spraying methods. The possibility of sintering the hollow glass microspheres of the $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system with powder and aluminum powder has been theoretically substantiated and experimentally confirmed. It extends the physical and chemical representations of sintering of sodium-silicate microspheres and it has been tested on sintering with bronze and babbitt powders. Creation of new compositions is based on the established regularities of glass microspheres and powders of $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ systems staying in amorphous and crystalline states with the subsequent formation of poly- and ultra-dispersed structure with the effect of “metallization” of glass inclusions, which will promote the increase of X-ray protective properties. The influence of glass inclusions on radiation stability in conditions of γ -radiation of Co^{60} , strength, thermophysical, damping properties of electric-arc coatings on the basis of Sv-08G2S and Sv-AMg5 have been investigated and laid the foundation of development of conceptual provisions for increasing the complex protection of blocks and modules of vessels and floating facilities for radioactive wastes. New scientific and methodical principles for assessing of technical condition of composite vessel constructions have been developed: the classification of design, technological and operational defects has been made according to the specified indicators of materials damage; the connection between design, technological, and operational factors has been established with the help of cause-effect diagrams and cognitive models. The design of the biological protection module has been improved by rationally replacing of the traditional two-sided facing by stainless steel with a one-sided sheet of carbon steel with metal-glass protective layer in form of glass-aluminum sintered tiles or metal-glass electric-arc coating, which makes it possible to reduce its mass by 10%; the stress-strain state of layered panels in conditions of short-term temperature loads in cases of emergency situations during the transportation of medium and high-level radioactive wastes has been investigated; a new analytical model of vessel operation based on the informational model of loading with algorithmization of cargo operations according to the conditions of strength has been developed. Scientifically substantiated and proposed a new approach to designing of elements of biological protection of floating facilities, which are intended for the storage of radioactive wastes with residual heat release, which is a simulation of design situation from the positions of limitation of the power of residual heat release and allows obtaining information about the temperature distribution and air circulation in the cargo are; for this was first formulated and solved the stationary problem of thermal state in a three-dimensional conjugate formulation; as example a vessel tank with a multilayered wall has been taken. The technological offers for repair and operational measures, introduction of constructive decisions

with the use of new materials and coatings have been developed; the innovative attractiveness has been analyzed and the economic efficiency of developments has been determined.

Key words: *elements of vessels and floating facilities, radioactive cargoes, design, construction, evaluation of technical state, technology, glass powders and microspheres, amorphous and crystalline state, sintering, metal-glass materials and coatings, electric-arc spraying.*

Формат 60×84^{1/16}. Умов. друк. арк. 1,88. Тираж 100 пр. Зам. № 8/19

Видавець та виготовлювач Торубара В. В.

вул. Наваринська, 5–17, м. Миколаїв, 54001, тел.: (067) 800-70-70
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4626 від 9.10.2013