

УДК 629.56: 539.388

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ РАДИОАКТИВНЫХ ГРУЗОВ

Казимиренко Ю.А.

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,
пр. Героев Сталинграда 9, Николаев, Украина, 54000
E-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com*

Аннотация. Разработаны научные основы проектирования, изготовления и оценки технического состояния элементов, выполняющих функцию биологической защиты на судах и плавучих сооружениях, предназначенных для транспортировки и хранения радиоактивных грузов. Решение проблемы защиты элементов от воздействия ионизирующих излучений химически активных сред, термоциклических нагрузок реализовано путем создания новых металл-стеклянных материалов и покрытий.

Abstract. The scientific basis of designing, manufacturing and technical state assessing of elements, which perform biological protection functions on vessels and floating facilities, which are intended for radioactive cargoes transportation and storage has been developed. The solution of the problem of elements protection from the effects of ionizing radiation of chemically active environment and thermocyclic loads has been implemented by creation of new metal-glass materials and coatings.

Ключевые слова: суда, плавучие сооружения, радиоактивные грузы, элементы судов, биологическая защита, металл-стеклянные материалы, покрытия

Key words: vessels, floating facilities, radioactive cargo, vessel elements, biological protection, metal-glass materials and coatings

Введение. Современное состояние проектирования и постройки судов для радиоактивных грузов. Постройка и модернизация судов, предназначенных для транспортировки или временного хранения радиоактивных веществ (РАВ) является важной проблемой в развитии технического флота и связана с европейскими программами обращения с радиоактивными отходами. Усовершенствование научных подходов к решению проектных и технологических задач, направленных на повышение технико-экономических показателей эксплуатации судов предусматривает разработку новой теоретической и технологической базы для проектирования, изготовления и оценки технического состояния элементов биологической защиты, которые изолируют упакованные и неупакованные грузы от оборудования и персонала. Применяемые принципы проектирования [1] позволяют определять оптимальные размеры по прочностным и стоимостным показателям, однако не учитывают энергетические характеристики радиоактивных грузов, процессы теплообмена в грузовой зоне и механизмы взаимодействия излучений с материалами конструкций. Решение задач снижения массы элементов судов и одновременного повышения уровня их защиты от ионизирующих излучений (ИИ) возможно путем разработки и внедрения новых материалов и покрытий с комплексно-защитными свойствами, состав и структура которых обеспечивают определенные механизмы ослабления излучений, коррозионную и термическую стойкость, для чего целесообразно соединить в одной композиции компоненты с разной поглощательной и отражательной способностью, в частности, металл со стеклом.

Цель статьи – создание научных основ проектирования, изготовления и оценки технического состояния модулей и блоков биологической защиты, учитывающих энергетические характеристики радиоактивных грузов и включающих в себя разработку комплексно-

защитных материалов и покрытий, что, в свою очередь, направлено на повышение технико-эксплуатационных показателей элементов судов и плавучих сооружений.

В работе рассмотрено два направления: хранение радиоактивных отходов на плавучих базах (несамоходных однопалубных судах) и транспортировка твердых радиоактивных грузов низкой и средней активности без остаточного тепловыделения на сухогрузных судах вместе с другими опасными грузами.

Методология исследований и гипотезы научных положений.

В основу исследования положена обобщенная **научная гипотеза** о повышении эффективности биологической защиты на судах и плавучих сооружениях за счет проектирования многослойных элементов, где максимальная энергия ионизирующих и тепловых излучений радиоактивных грузов поглощается метал-стеклянным защитным слоем.

Методология постановки научных исследований представлена на рис. 1.

В табл. 1 представлены гипотезы, положенные в основу исследований и методы их реализации.

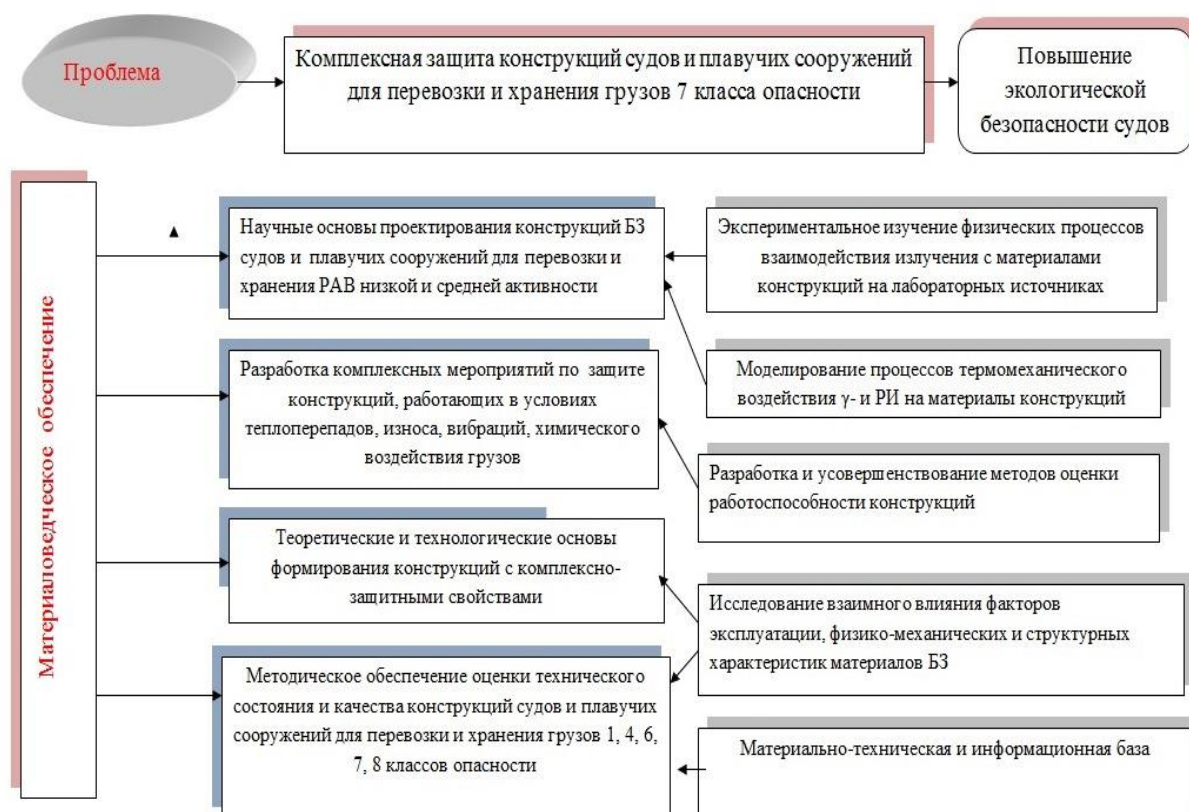


Рис. 1. Методология постановки научных исследований

Проблема создания новых материалов и покрытий решена с помощью технологий горячего прессования смеси порошка или пудры алюминия с полыми стеклянными микросферами натрийборсиликатного состава и электродугового напыления цельнотянутых проволок марок Св-АМг5 и Св-08Г2С с введением полых стеклянных микросфер и порошков, полученных сухим измельчением стекол натрий-кальций-силикатной и свинцово-силикатной систем [9]. Выбор составов новых композиций основан на принципе создания эффекта многократного внутреннего отражения потока излучений в среде поглощения, обусловлен современным опытом применения стекол в технологиях изолирования радиоактивных отходов и создания радиационно стойких материалов. Установлены механизмы ослабления γ - и рентгеновских излучений структурными элементами: полыми стеклянными микросферами, сплошными стеклянными частицами, ультра- и микропорами, субструктурными

элементами материалов и покрытий, которые в отличие от существующих аналогов характеризуются структурной стабильностью и повышенными на 30...40 % рентгенозащитными свойствами [10]. Таким образом, обеспечить защиту, эквивалентную облицовке свинцом толщиной 1 мм можно путем нанесения электродуговых покрытий толщиной 1,5...2 мм или формированием на поверхности Ст3 стеклоалюминиевых плиток, толщина которых с учетом технологических особенностей изготовления должна быть более 10 мм. Экспериментально установлено, что при эксплуатации в условиях γ -излучений Co^{60} с суммарной активностью источников 37127 Ки металл-стеклянные покрытия толщиной 2 мм на 28...56 % экранируют пластинку Ст 3, препятствуя ее радиационному упрочнению [11] и предотвращая коррозионное разрушение в 20 % растворах серной, соляной и азотной кислот [12], которые входят в состав большинства дезактивационных растворов. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена гипотеза о тепловой природе радиационных дефектов в структурно-неоднородных композициях, что объясняет поверхностное упрочнение электродуговых покрытий и влияние дисперсных стеклянных включений на процесс развития поверхностной пористости [11]. Полученные результаты расширяют физико-химические представления о формировании структуры и ее влияния на механизмы ослабления жестких излучений, они положены в основу усовершенствования теории проектирования, объясняя целесообразность замены материалов и толщин слоев [13].

Таблица 1

Гипотезы и методы научных исследований

Объект исследований	Гипотезы научных исследований	Методы исследований
Повышение защиты элементов судов	В основу повышения защиты элементов судов положен механизм многократного поглощения диффузного потока ИИ, что возможно путем формирования слоистых конструкций	Физико-химические основы нанесения газотермических покрытий и горячего прессования порошковых материалов [2, 3]
	Комплексно-защитные свойства материалов являются структурно-чувствительными характеристиками	Теоретические основы радиационного материаловедения и радиационной химии [4, 5]
Проектирование модуля биологической защиты	Максимальное ослабление излучений от РАВ обеспечивается металл-стеклянным защитным слоем	Методики исследования рентгенозащитных свойств, радиационной и коррозионной стойкости [6, 7]
Процессы влияния ИИ на структуру и свойства металл-стеклянных композиций	Гипотеза о поверхностном упрочнении металлов под действием высоких температур и ионизирующих излучений	Аналитические представления о температурных напряжениях в структуре металл-стеклянных материалов и покрытий [8]

В основу **проектного исследования** плавучего сооружения, предназначенного для хранения РАВ с остаточным тепловыделением положено решение задачи о тепловом состоянии грузовой зоны, ограниченной блоком биологической защиты с корпусом из плакированной стали, внутри которого размещены два цилиндрических бака с радиоактивными веществами [14]. В основу математического описания процессов теплообмена между радиоактивными грузами, изнутри равномерно прогревающими стенки баков, и циркулирующем в пространстве двойного борта или дна воздухом, положены критериальные уравнения и уравнение теплового баланса, устанавливающие взаимосвязь между мощностью тепловыделения в диапазоне 2...20 кВт, объемом баков, толщинами слоев и коэффициентами теплопроводности применяемых материалов. В проектном плане задача рассмотрена на примере одиночного бака с многослойной теплопроводной стенкой и сформулирована для плавучего сооружения впервые. Объектом для расчетного анализа выбрана плавбаза с известными размерениями, применяемая в зарубежной практике для длительного хранения высокоактивных отходов.

Результаты представлены в виде распределения полей температур и потоков циркулирующего воздуха, что показало неравномерность распределения температур по объему грузовой зоны. Наиболее разогретой является верхняя часть модели, приближенная к крышке, однако интенсивное движение воздуха препятствует созданию пожароопасных ситуаций.

Установлено что применение стеклоалюминиевых композиций на 60...80 градусов снижает температуру максимально разогретых поверхностей. Результаты числового моделирования подтверждены решением задач в плоской постановке, в результате показана целесообразность снижения толщины бетонного слоя с 800 мм до 200 мм, что способствует снижению массы блока, более чем в два раза. Моделирование проектной ситуации позволило установить ограничение по мощности остаточного тепловыделения на уровне 230 Вт/м³ без оборудования плавучего сооружения средствами принудительного охлаждения.

Полученные значения температур далее используются для прогнозирования прочности и разрушения конструкций с металл-стеклянным защитным слоем в условиях тепловых эффектов. Теория разрушения представлена в виде:

- термомеханической модели [15], описывающей температурные деформации микроразделов, учитывающей в отличие от существующих аналогов влияние пористости, диаметра и объемного содержания стеклянных включений;
- модели поверхностного упрочнения [15], учитывающей структурные особенности облученных зон и подтверждающей гипотезу формирования в местах наибольших напряжений субструктурных элементов, что дает новые научные представления о механизмах поглощения энергии микрослоями структурно неоднородных композиций.

Задача снижения массы модульных конструкций биологической защиты решена путем замены двухсторонней облицовки бетонных панелей из нержавеющей стали на одностороннюю облицовку сталью Ст3 с защитным слоем в виде электродугового покрытия или стеклоалюминиевых плиток [13], которые крепятся к стальной поверхности с помощью клеевой композиции на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-20. Расчеты геометрических размеров модуля [16] выполнены на примере размещения в нем двух 20-ти футовых ИСО-контейнеров, где в середине каждого из них в два ряда расположены 54 бочки с урановым рудным концентратом. Масса предлагаемого модуля на 10 % ниже массы аналога, это дает возможность повысить загрузку судна и расширить ассортимент перевозимых грузов. Предложена модель функционирования сухогрузного судна, включающая разработку новой информационной системы и решение оптимизационной задачи об эффективном размещении модуля биологической защиты с критерием минимизации стояночного времени линейного рейса. Эффективность применения модулей подтверждена моделированием процесса разрушения в экстремальных условиях кратковременного температурного нагружения.

Информация о появлении и развитии дефектов в материалах и покрытиях в условиях облучения, термоциклических нагрузок, химически активных сред, систематизирована с помощью новой информационно-поисковой системы [17], что вместе с причинно-следственными диаграммами и когнитивными моделями составляют научно-методические основы оценки технического состояния.

Обобщенные результаты исследований представлены на рис. 2.

Технико-экономическое обоснование предложенных разработок выполнено на основе критериев технологичности и экономической эффективности. Оптимальное решение найдено из определения комплексного коэффициента технологичности, учитывающего минимизацию массы, материальных затрат, рациональное использование материалов, трудоемкость работ и сложность конструкций, чему в наибольшей степени соответствует панельная конструкция модуля, состоящая из бетонной плиты толщиной 200 мм, облицованной с одной стороны листом углеродистой стали со стеклоалюминиевыми плитками толщиной 10 мм; среди металл-стеклянных покрытий предпочтение отдается композиции на основе Св-08Г2С, наполненной полыми стеклянными микросферами.

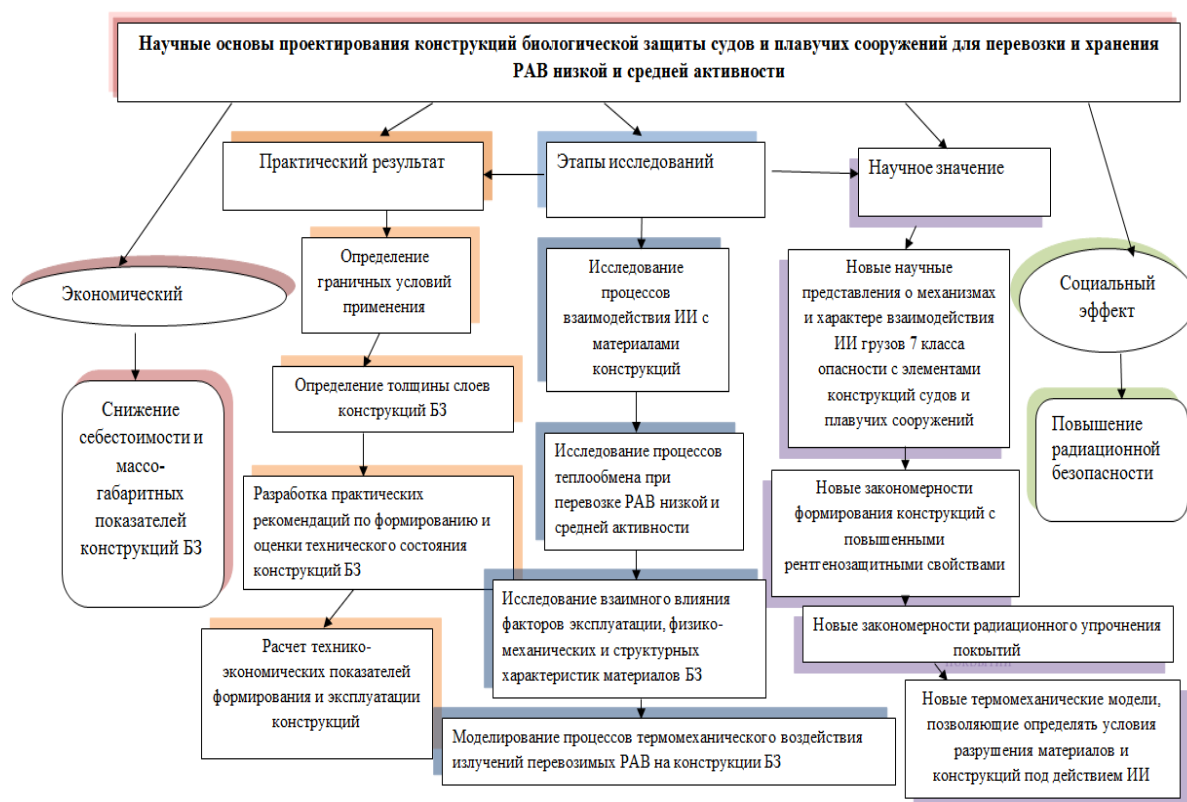


Рис. 2. Научные основы проектирования элементов биологической защиты судов и плавучих сооружений для перевозки и хранения радиоактивных веществ: научное значение и практические результаты

Инновационная привлекательность новых технических решений в проектировании и изготовлении с использованием метал-стеклянных материалов и покрытий элементов судов представлена в виде модели, учитывающей рентабельность полученных результатов и социальный эффект [18].

Выводы. В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований разработаны общие теоретические и технологические основы, включающие новые закономерности и знания о процессах и механизмах, характеризующие влияние энергетических параметров и других свойств радиоактивных грузов на проектные критерии, технологию изготовления и монтаж защитных элементов и позволяющие на микро- и наноуровне прогнозировать энергетическую природу их повреждаемости и разрушения, что объединяет проектные и технологические направления судостроения с физико-химическими процессами создания новых металл-стеклянных материалов и покрытий. Полученные результаты в комплексе обеспечивают защиту элементов судов и надежное изолирование радиоактивных грузов.

Литература

1. Егоров, Г. В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска [Текст] / Г. В. Егоров. СПб.: Судостроение, 2007. 384 с.
2. Дубовий, О. М. Технологія напильних покриттів [Текст] : навч. посібник для вузів / О. М. Дубовий, А. М. Степанчук. Миколаїв: НУК, 2007. 236 с.
3. Жорник, В. А. Моделирование процессов спекания порошковых покрытий при тепловом и механическом воздействиях [Текст] / В.А. Жорник, Ю.А. Прокопенко // Вест. ТГТУ. Тамбов, 2010. Т. 16, № 1. с. 59–66.
4. Арбузов, В. И. Основы радиационного оптического материаловедения [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. И. Арбузов. СПб.: СПбГУИТМО, 2008. 284 с.

5. Пикаев, А. К. Современная радиационная химия. Основные положения. Экспериментальная техника и методы [Текст] / А. К. Пикаев. М.: Наука, 1985. 375 с.
6. Исследование ослабления ионизирующего излучения композиционными материалами [Текст] / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко, С. И. Шкурат и др. // 36. науч. пр. НУК. Миколаїв: НУК, 2009. № 2 (425). с. 105–109.
7. Воеводин В. Н. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов [Текст]/В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. К.: Наук. думка, 2006. 378 с.
8. Кржечковский П. Г. Температурные усадочные напряжения и деформации в композитах, наполненных стеклянными микросферами [Текст] / П. Г. Кржечковский, В. А. Науменко, В. И. Павлищев // Технология судостроения и сварочного производства в судостроении: сб. науч. тр. Николаев, 1976. с. 70–77.
9. Фарионова Т.А. Выбор состава композиционных материалов и покрытий технических средств для перевозки опасных грузов на основе экспертных оценок [Текст] / Т. А. Фарионова, Ю.А. Казимиренко/ Вісн. НУК (електрон. вид.). Миколаїв: НУК, 2011. С. 155–164.
10. Kazymyrenko Y. Patterns and mechanisms of interaction of radioactive cargo radiation with metal-glass layer of watercrafts structure [Text] / Y. Kazymyrenko // The advanced science journal. 2014. Iss. 12. P. 45–48.
11. Kazimirenko Y. A. Radiation resistance of metal-glass coatings for floating composite structures [Text]/ Y.A. Kazimirenko, V.V. Schlapatskaya // Shipbuilding & marine infrastructure. – 2015. № 1 (3). P. 111–121.
12. Казимиренко Ю. О. Корозійний захист сталевих цистерн для зберігання рідких радіоактивних речовин на плавучих спорудах [Текст] / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 2016. № 7 (11), vol. 2. P. 16–21.
13. Казимиренко Ю. А. Перспективные материалы, способы и технологические направления формирования конструкций биологической защиты судов и плавучих сооружений для радиоактивных грузов [Текст] / Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. Baki : Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, 2017. № 2. с. 39–44.
14. Казимиренко Ю. А. Влияние энергетических параметров радиоактивных грузов на процессы теплопереноса и прочность композитных конструкций плавучих сооружений [Текст] / Ю.А. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 2016. № 4 (8), vol. 7. P. 58–63.
15. Kazymyrenko Y. The Thermomechanical Processes in metal-glass Coating of Vessel Constructions and Floating Facilities for radioactive Cargo [Text] / Y. Kazymyrenko // The advanced science. 2016. ISS. 2. P. 38–44.
16. Казимиренко, Ю. О. Аналітична модель функціонування судна на основі побудови інформаційної системи завантаженості [Текст] / Ю. А. Казимиренко // ScienceRise : науч. журн. Х. : Технологический центр, 2018. № 1 (42). с. 43–49.
17. Казимиренко, Ю. А. Информационная поддержка оценки технического состояния конструкций судов и плавучих сооружений [Текст] / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова // Управління розвитком складних систем : зб. наук. пр. К. : КНУБА, 2015. № 12. С. 111–117.
18. Дрозд О. В. Вплив управління загальноосвітнім процесом на критерії інноваційної привабливості суден для радіоактивних вантажів [Текст]/О.В. Дрозд, О.С. Рижков, Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 2018. № 1 (29), vol. 1. P. 59–65.

Tövsiyə edib: t.e.d., prof. A.T.Məmmədov