



Казимиренко Ю. А.,  
Савочкина В. В.

## ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПОДХОДА

*Исследовано влияние материалов композиционного защитного слоя на комплексные показатели технологичности конструкций биологической защиты судов и плавучих сооружений, предназначенных для перевозки и хранения радиоактивных грузов низкой и средней активности. С помощью системотехнического подхода выбран экономически обоснованный вариант конструкции. Полученные результаты следует использовать на этапах проектных разработок, технологической подготовки производства, постройки и эксплуатации.*

**Ключевые слова:** плавучие сооружения, конструкции биологической защиты, системотехнический подход, технологичность.

### 1. Введение

Решение проблемы утилизации и переработки радиоактивных веществ низкой и средней активности связано с созданием судов и плавучих сооружений. Снижение уровня ионизирующих излучений достигается в результате размещения в грузовой зоне конструкций биологической защиты (БЗ), которые представляют собой панельный экран, изготовленный из нескольких слоев материалов с разной поглощающей способностью, рациональный выбор которых обеспечивает эффективные конструктивно-компоновочные решения, отвечающие требованиям надежности, долговечности, технологичности.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Представленные в работах [1–3] результаты показали перспективы применения новых композиционных материалов и покрытий, для их дальнейшего внедрения в судостроительные технологии необходимо выполнить оценку показателей технологичности и себестоимости. Современные методы оценки стоимости новых объектов техники включают приемы статистики: стоимость нового изделия определяется по данным существующих аналогов, приравнивается к массогабаритным параметрам, вводятся обобщенные показатели стоимости, характеризующие относительные или абсолютные величины материальных и технологических затрат, сложности конструкций, показателей эксплуатации [4–6]. Наиболее универсальным методом, описывающим выбор оптимальных решений в технологическом производстве, является системотехнический подход [5, 6], где в качестве критерия экономической эффективности вводится комплексная оценка технологичности. По мнению авторов работ [7, 8] вопросы технологичности необходимо рассматривать на всех этапах жизненного цикла судна.

В мировой практике судостроения конструкции биологической защиты специализированных судов и пла-

вучих сооружений изготавливаются из радиационно-стойких бетонов с облицовкой из лакированных и нержавеющей сталей [9–11]. Авторы работ, освещающих новые направления в технологии судостроения [7, 8] недостаточно уделяют внимания вопросам технологической подготовки производства с применением новых материалов. В работах [9–12], отражающих перспективные решения проектирования, строительства и переоборудования судов и плавучих сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов не рассматриваются вопросы технологичности конструкций, для расчетов толщин и массогабаритных показателей используются известные справочные данные, которые носят обобщенный характер.

Внедрение новых материалов в судостроительные технологии направлено на повышение защитных свойств конструкций, снижение массы и показателей материалоемкости. Большое количество применяемых показателей и расширение номенклатуры используемых материалов усложняет выбор конструктивно-компоновочных решений, максимально отвечающих условиям эксплуатации. В связи с этим возникает необходимость введения и детализации комплексных показателей технологичности конструкций биологической защиты судов и плавучих сооружений.

### 3. Объект, цель и задачи исследований

*Объект исследований* — процесс детализации комплексных показателей технологичности композитных конструкций биологической защиты судов и плавучих сооружений, предназначенных для перевозки и хранения радиоактивных грузов низкой и средней активности.

*Цель исследований* — обоснованный выбор варианта конструкции БЗ судов и плавучих сооружений с использованием новых композиционных материалов и покрытий, отвечающего показателям технологичности и экономической эффективности.

Для достижения цели в работе необходимо решить задачи подбора критериев, определения показателей

технологичности и выбора на основании комплексной оценки наиболее эффективного конструктивного решения.

#### 4. Методика оценки технологичности конструкций биологической защиты судов и плавучих сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов

**4.1. Критерии оценки технологичности конструкций биологической защиты.** Комплексно-системный подход к изучению вопросов технологичности судовых конструкций отвечает современным представлениям о качестве и позволяет без выполнения оптимизационных задач выбрать рациональное конструктивное решение. Критерием, определяющим соответствие конструкций технологическим требованиям, в работе выбран коэффициент комплексной технологичности  $K_k$ , учитывающий минимизацию массы, материальных затрат, рациональное использование материалов, трудоемкость выполняемых работ и сложность композитных конструкций. В расчетах используется метод определения коэффициента  $K_k$  [5, 6], основанный на системе уменьшения максимального значения и введения корректирующих коэффициентов:

— материалоемкости  $K_m = \frac{M_i}{M_{ni}}$  — отношения чистой

массы конструкции  $M_i$  к номинальному значению массы  $M_{ni}$   $i$ -го материала для изготовления конструкций;

— сложности конструкции:

$$K_{сл} = \frac{n^6}{n^{н6}} \cdot K_r, \quad (1)$$

где  $K_r$  — коэффициент, учитывающий габариты исследуемой конструкции;  $n^6$  — количество составных элементов;  $n^{н6}$  — количество составных элементов конструкции конкурентного аналога;

— технологичности конструкции по трудоемкости:

$$K_T = 1 - \frac{T_i}{T_a}, \quad (2)$$

где  $T_i$  — время подготовительной обработки;  $T_a$  — время подготовительной обработки для конкурентной конструкции.

В расчетах также необходимо учитывать коэффициенты: технологичности по себестоимости  $K_c$  и технологичности материала  $K_{техн.}$ , которые рассматриваются из показателей технологического процесса. Результатом является построение номограммы для определения комплексного коэффициента технологичности  $K_k$ , отображающей функциональную зависимость входящих переменных.

**4.2. Материалы и конструктивные варианты.** В качестве базового варианта конструкций (вариант 0) выбрана конструкция, состоящая из бетонной заливки толщиной 800...1000 мм, изготовленной из радиационно-стойкого бетона (ГОСТ 25192-2012), облицованной с одной стороны листом плакированной стали (ГОСТ 10885-85)

толщиной 300...400 мм. Внутри конструкции БЗ устанавливаются контейнеры или баки с радиоактивным грузом, выполненные из нержавеющей стали, например 12X18H10T (ГОСТ 5632-72) или 09Г2С (ГОСТ 5520-79). Данный вид конструкций применяется на специализированных плавучих сооружениях [9]. На судах для перевозки высокоактивных грузов конструкция БЗ состоит из бетонной плиты толщиной 200 мм, облицованной с двух сторон нержавеющей легированной сталью с толщиной листа 10 мм [10, 11], такой вариант принят как допустимый (вариант 1). Конкурентоспособным предложением, существенно снижающим материально-технические затраты, является замена листа нержавеющей стали на более дешевую сталь обыкновенного качества, например, Ст3 (ГОСТ 5521-93). Защита от вредного воздействия грузов обеспечивается композиционным слоем, состав и технология нанесения которого определяют стоимостные показатели конструкций. Следующие, рассматриваемые в работе варианты отличаются друг от друга видом композиционного слоя: для вариантов 2–4 — это электродуговые покрытия на основе Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70), наполненные соответственно полыми стеклянными микросферами (ПСМ), например, марки МС-А-9 (ТУ 6-48-108-94), порошками, полученными из бытовых отходов натрийсиликатного (ГОСТ 24315-80) и свинцовосодержащего (ГОСТ 9541-75) стекол. Варианты 5–7 включают применение электродуговых металlostеклянных покрытий на основе Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75), также наполненных ПСМ, порошками натрийсиликатного и свинцовосодержащего стекол. Режимы и технологические основы формирования электродуговых покрытий изложены в работе [3]. Варианты 8–11 включают применение алюмоматричных горячепрессованных плиток, которые с помощью клеевой композиции крепятся к стальной поверхности конструкций. Технология формирования плиток основана на спекании порошка (марки ПА-5, ГОСТ 6058-73) или пудры алюминия (марки АПС-1А, ГОСТ 5494-95) с ПСМ, порошками SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [1]. Соответственно вариант 8 предусматривает применение защитного слоя из композиции ПСМ — ПА-5; вариант 9 — ПСМ — АПС-1А, 10 — Al-SiC; 11 — Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### 5. Результаты расчетов показателей технологичности конструкций биологической защиты с применением новых композиционных материалов и покрытий

Комплексный коэффициент технологичности  $K_k$  зависит от технологических факторов и включает стоимостные показатели. При выполнении расчетов использовались значения стоимости стальных листов, поставляемых компанией «Senerstal Distribution»: марки 12X18H10T (ГОСТ 5632-72) — 46000 грн/т; Ст3 (ГОСТ 5521-93) — 7277 грн/т, плакированной стали (ГОСТ 10885-85) — 60000 грн/т. Стоимость бетона марки М500 (ГОСТ 25192-2012) плотностью 2298 кг/м<sup>3</sup> принята 2250 грн/т. Толщина защитного слоя для электродуговых покрытий принята 1 мм, для алюмоматричных материалов — 10 мм. Для вариантов 8–11 также учитывалась стоимость клеевой композиции толщиной 1 мм. Стоимостные показатели вариантов 2–11 зависят от

вида защитного композиционного слоя и определяются коэффициентами материалоемкости  $K'_M$ , энергоемкости  $K_3$  и технологической себестоимостью (табл. 1). Показатель материалоемкости  $K'_M$  зависит от толщины защитного слоя конструкции и по своему смыслу в большей степени характеризует коэффициент использования материала [6]. Расширенное значение этого важного для производства показателя рассматривается автором работы [13] и включает расход и стоимостные показатели основных и дополнительных материалов, электроэнергии, применяемого оборудования. Коэффициент энергоемкости  $K_3$  характеризует расход энергии на единицу продукции. Расчеты технологической себестоимости защитного слоя выполнены для погонного м<sup>2</sup> с учетом плотности композиционного материала или покрытия.

Таблица 1

Технико-экономические показатели формирования защитного композиционного слоя

Композиционный материал, покрытие	$K'_M$	$K_3$	Плотность защитного слоя, кг/м <sup>3</sup>	Технологическая себестоимость 1 м <sup>2</sup> толщиной 1 мм, грн
ПСМ — ПА-5	0,82	3,24	1200	64,25
ПСМ — АПС-1А	0,85	3,24	1100	77,8
Al-SiC	0,60	3,25	2000	90,0
Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,65	3,25	1720	82,56
Св-08Г2С — ПСМ	0,77	7,13	5900	198,15
Св-08Г2С — натрийсиликатное стекло	0,45	7,13	7000	75,0
Св-08Г2С — свинцово-содержащее стекло	0,55	7,13	7100	77,86
Св-АМг5 — ПСМ	0,87	7,13	1480	95,0
Св-АМг5 — натрийсиликатное стекло	0,50	7,13	1770	79,0
Св-АМг5 — свинцово-содержащее стекло	0,55	7,13	1860	91,5
Клеевая композиция ЭД-20 — ПСМ	0,55	2,9	60,0	70,0

Расчет коэффициента сложности  $K_{сл}$  выполнен для составной панели с габаритными размерами 1,5 × 1,5 м, что позволяет приравнять коэффициент, учитывающий габариты  $K_T$  в формуле (1) к единице.

Коэффициент технологичности материалов  $K_{техн}$  целесообразно выразить как произведение коэффициентов материалоемкости защитного слоя  $K'_M$  на коэффициент энергоемкости  $K_3$ :

$$K_{техн} = K'_M \cdot K_3. \quad (3)$$

Коэффициент технологичности конструкции по трудоемкости  $K_T$  связан с уровнем сложности конструкций и определяется штучно-калькуляционными расчетами технологического процесса. Подготовительные операции изготовления конструкций БЗ подразделяются на подготовку стальной поверхности и подготовку компонентов для формирования защитного слоя. Подготовка стальной поверхности включает очистку от ржавчины, окислы,

заусенцев; для случая нанесения электродугового напыления выполняется струйно-абразивная обработка. Облицовка алюмоматричными плитками предусматривает разметку поверхности с помощью трафаретов, изготовление и нанесение клеевой композиции с одновременной облицовкой плитками. Кроме того, возникает необходимость заделки и герметизации стыков. При расчетах также учитывается окончательная обработка жидким стеклом (ГОСТ 13078-81), выполняемая с целью повышения коррозионной стойкости.

Влияние всех рассмотренных параметров на комплексный показатель технологичности конструкций  $K_K$  представлен в виде номограммы (рис. 1), состоящей из шести логарифмических шкал, каждая из которых соответствует коэффициентам: технологичности конструкции по трудоемкости  $K_T$ , по себестоимости  $K_с$ , материалоемкости  $K'_M$ , сложности  $K_{сл}$ , технологичности материала  $K_{техн}$  и комплексной технологичности конструкции  $K_K$ .

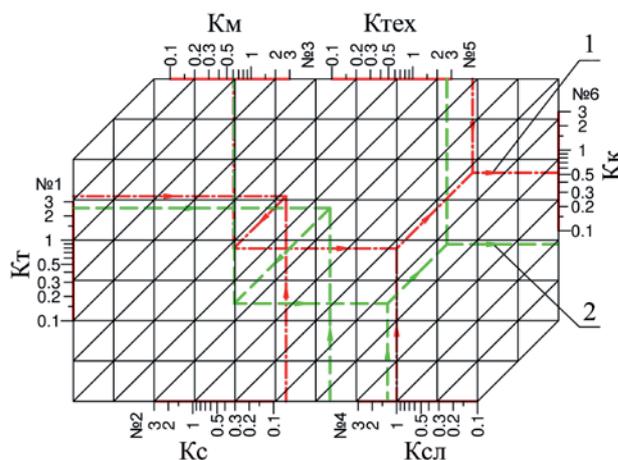


Рис. 1. Номограмма для определения комплексного коэффициента технологичности конструкций БЗ с композиционным защитным слоем из композиций: 1 — Св-08Г2С — ПСМ (вариант 2); 2 — ПСМ — ПА-5 (вариант 8)

Полученная номограмма позволяет расчетно-графическим методом установить базовые показатели для формирования технологических резервов производства.

## 6. Выбор наиболее эффективного варианта конструкции биологической защиты

Результаты расчетов показали, что для вариантов 2–7 масса панели размером 1,5 × 1,5 м составляет 2,805...2,817 т, для вариантов 8–11 — 2,825...2,870 т, что в 2...5,5 раз меньше масс допустимого и базового вариантов. Для всех рассматриваемых случаев средний коэффициент материалоемкости  $K'_M$  равен 0,6...0,65. Коэффициент сложности конструкций  $K_с$  для вариантов 2–7 равен 1, для вариантов 8–11 — 1,3. Самым высоким коэффициентом технологичности используемых материалов  $K_{техн}$  характеризуются варианты 2 и 5 с защитным слоем в виде электродуговых покрытий, наполненных полами стеклянными микросферами ( $K_{техн} = 6,0...6,2$ ), в два раза ниже ( $K_{техн} = 3,0...3,2$ ) этот показатель составляет для вариантов 8–11 с облицовкой из алюмоматричных плиток. Коэффициент технологичности

по себестоимости  $K_c$  для всех вариантов приблизительно составляет 0,025...0,07. Таким образом, всем требованиям, предъявляемым к технологичности конструкций, в наибольшей степени отвечает вариант 2: комплексный показатель технологичности  $K_k = 0,52$ ; самым низким коэффициентом ( $K_k = 0,07$ ) характеризуется вариант 8, что объясняется существенной разницей в заданных для расчетов толщинах защитного слоя. Технологические показатели этих вариантов в качестве примера показаны на рис. 1. Следует отметить, что полученные результаты носят субъективный характер, учитывающий в первую очередь, стоимостные и массогабаритные ограничения. Незначительный разброс полученных результатов (до 5–7 %) свидетельствует о применимости всех полученных вариантов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой технологических рекомендаций по изготовлению конструкций биологической защиты судов и плавучих сооружений, предназначенных для перевозки и хранения радиоактивных грузов низкой и средней активности.

## 7. Выводы

Рассмотрена развернутая характеристика технико-экономических показателей изготовления конструкций БЗ с построением номограммы для определения комплексного коэффициента технологичности с разными видами композиционного защитного слоя, что позволит осуществлять разработку организационно-технических мероприятий и прогнозировать динамику формирования факторов экономической эффективности.

Полученные результаты свидетельствуют о применимости всех рассмотренных вариантов конструкций. Наилучшим вариантом является панельная конструкция биологической защиты, состоящая из бетонной плиты (марки М500) с облицовкой из углеродистой стали (марки Ст3) с защитным слоем из композиции Св-08Г2С – ПСМ, нанесенным электродуговым методом.

## Литература

1. Казмиренко, Ю. А. Формирование конструкций плавучих композитных сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов [Текст] / Ю. А. Казмиренко // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — № 6/5(20). — С. 7–9. doi:10.15587/2312-8372.2014.31884
2. 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. — № 12. — P. 45–48. doi:10.15550/asj.2014.12.045
3. Казмиренко, Ю. А. Формирование ультрадисперсной структуры в композиционных электродуговых покрытиях, наполненных полыми стеклянными микросферами [Электронный ресурс] / Ю. А. Казмиренко, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов, К. О. Тумаков // Вісник Національного університету кораблебудування. — Миколаїв: НУК, 2012. — № 3. — Режим доступа: \www/URL: http://evn.nuos.edu.ua/article/view/23001
4. Линник, А. К. Постановка задачи о стоимостной инженерии [Текст] / А. К. Линник, А. А. Балдин // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. — 2013. — Т. 15. — С. 58–62.
5. Павлов, И. Д. Системотехническая оценка комплексной технологичности проектных решений строительных конструкций бионического типа [Текст]: сб. науч. тр. / И. Д. Павлов, М. А. Каплуновская // Строительство, материаловедение, машиностроение. — Днепропетровск: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2009. — Вып. 50. — С. 232–236.
6. Павлов, И. Д. Организационно-техническое обоснование некоторых критериев технологичности на основе системотехнических принципов [Текст] / И. Д. Павлов, М. А. Каплуновская // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». — 2008. — Вып. 85. — С. 192–198.
7. Перов, В. Н. Технологичность корпусных конструкций [Текст]: уч. пос. / В. Н. Перов, Н. В. Цикало. — Николаев: НУК, 2012. — 72 с.
8. Жуков, Ю. И. Формирование условий поддержки жизненного цикла изделий судового машиностроения на этапе технологической подготовки строительства судна [Текст] / Ю. И. Жуков, Б. Л. Резник, В. А. Рогозин, В. И. Черненко // Морские интеллектуальные технологии. — 2010. — Спецвыпуск. — С. 133–135.
9. Александров, Н. И. Разработка установки кондиционирования ЖРО, образующихся на нефтедобывающих морских платформах и терминалах [Текст] / Н. И. Александров, П. Л. Ляшин, В. В. Петухов, С. П. Малышев // Судостроение. — 2013. — № 2. — С. 61–64.
10. Барышников, М. В. Перевозка ОЯТ морским транспортом [Текст] / М. В. Барышников, А. В. Худяков, В. М. Овсянников, В. И. Шлячков // Безопасность окружающей среды. — 2010. — № 1. — С. 98–105.
11. Sannen, H. Shipment of radioactive materials: historical overview of IAEA regulations — a personal perception [Text] / H. Sannen // Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material. — 2007. — Vol. 18, № 1. — P. 19–20. doi:10.1179/174651007x191143
12. Рашковский, А. С. Методологические основы управления проектами строительства композитных плавучих сооружений [Текст] / А. С. Рашковский, Н. Г. Слудский, К. В. Кошкин. — Николаев: НУК, 2005. — 232 с.
13. Семашкина, З. Н. Материалоемкость производства: содержание и эволюция понятия [Электронный ресурс] / З. Н. Семашкина // Интернет-журнал «Науковедение». — 2014. — Вып. 4(23). — Режим доступа: \www/URL: http://naukovedenie.ru/PDF/43EVN414.pdf

## ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ КОМПЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ СУДЕН І ПЛАВУЧИХ СПОРУД НА ОСНОВІ СИСТЕМОТЕХНІЧНОГО ПІДХОДУ

Досліджено вплив матеріалів композиційного шару на комплексні показники технологічності конструкцій біологічного захисту суден і плавучих споруд, призначених для перевезення та зберігання радіоактивних речовин низької та середньої активності. За допомогою системотехнічного підходу обрано економічно обґрунтований варіант конструкції. Отримані результати слід використовувати на етапах проектних розробок, технологічної підготовки виробництва, будівництва та експлуатації.

**Ключові слова:** плавучі споруди, конструкції біологічного захисту, системотехнічний підхід, технологічність.

*Казмиренко Юлія Алексеевна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com. Савочкіна Вера Володимирівна, асистент, кафедра теорії та проектування суден, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: vira.savochkina@nuos.edu.ua.*

*Казмиренко Юлія Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна.*

*Савочкіна Вера Володимирівна, асистент, кафедра теорії та проектування суден, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна.*

*Kazymyrenko Yuliia, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com. Savochkina Vira, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: vira.savochkina@nuos.edu.ua*