

УДК 656.6

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ МЕЖРЕМОНТНОГО ПЕРИОДА СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

Зяблов Олег Константинович¹, доцент, кандидат технических наук

e-mail: zyablov_ok@mail.ru

Качанов Максим Альбертович¹, магистрант

e-mail: Kachanov03@list.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. По данным освидетельствований более 100 судов и расчётов методом конечных элементов обосновано увеличение межремонтного периода корпусов за счёт снижения концентрации напряжений и повышения качества сварки. Предлагаемые проектно-технологические решения позволяют продлить интервал между докованиями с 2,5 до 3,5 лет. Совокупный экономический эффект от внедрения за 14 лет составит более 100 млн руб. на одно судно при окупаемости дополнительных затрат – 2-3 года.

Ключевые слова: суда внутреннего плавания, корпусные конструкции, межремонтный период, концентрация напряжений, усталостная прочность, сварные соединения, экономическая эффективность.

OPTIMIZATION OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS TO INCREASE THE INTER-REPAIR PERIOD OF INLAND VESSELS

Oleg K. Zyablov¹, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

e-mail: zyablov_ok@mail.ru

Maxim A. Kachanov¹, Master's Degree student

e-mail: Kachanov03@list.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. According to the results of inspections of more than 100 vessels and finite element calculations, the increase in the inter-repair period of the hulls has been justified by reducing the stress concentration and improving the quality of welding. The proposed design and technological solutions make it possible to extend of the interval between docking operations from 2.5 to 3.5 years. The total economic effect over 14 years is more than 100 million rubles, for one vessel and the payback period for additional costs is 2-3 years.

Keywords: inland vessels, hull structures, overhaul period, stress concentration, fatigue strength, welded joints, and economic efficiency.

Проблема долговечности корпусных конструкций судов внутреннего плавания в настоящее время приобретает особую остроту. При среднем возрасте флота более 40 лет и

нормативном сроке службы 25–30 лет возникает объективная необходимость научно обоснованного подхода к продлению эксплуатационного ресурса [1]. Данное исследование опирается на комплекс теоретических положений механики корабля, теории упругости, сопротивления материалов и технологий судостроения [2], а также на результаты анализа статистической выборки освидетельствований Российского Классификационного Общества за период 2019–2024 годов [3].

Методологическая база исследования

Методология носит комплексный характер и включает:

1. Расчётные методы оценки прочности корпусных конструкций в соответствии с Правилами РКО, в том числе метод конечных элементов для анализа напряжённо-деформированного состояния в зонах конструктивных концентраторов.
2. Экспериментальные методы неразрушающего контроля – ультразвуковая толщинометрия и дефектоскопия сварных соединений [4].
3. Статистический анализ повреждаемости корпуса на основе репрезентативной выборки данных освидетельствований более 140 судов внутреннего плавания.

Нормативную основу составили Правила РКО, ГОСТ Р в области судостроения, а также положения международных конвенций МАРПОЛ и СОЛАС [5].

Количественный анализ факторов износа корпуса

По результатам мониторинга установлено следующее распределение дефектов:

- Вмятины днищевой обшивки – 32% случаев, преимущественно в носовой и кормовой оконечностях.
- Коррозионный износ настила палубы – 24%, средняя скорость износа составляет 0,10–0,15 мм/год при удовлетворительном состоянии покрытия, но может достигать 0,25–0,35 мм/год при его разрушении.
- Усталостные трещины в сварных швах набора – 18%, локализованы в соединениях флоров с обшивкой днища.
- Коррозия бортовой обшивки в районе переменной ватерлинии – 14% [6].

Таблица 1. Статистика повреждений корпусных конструкций судов внутреннего плавания по данным освидетельствований РКО за 2019-2024 гг.

Тип повреждения	Доля от общего числа дефектов, %	Характерная локализация	Критичность для прочности
Вмятины днищевой обшивки	32	Носовая и кормовая оконечности	Средняя
Коррозионный износ настила палубы	24	Открытые палубы, подпалубные цистерны	Высокая
Трещины в сварных швах набора	18	Соединения флоров с обшивкой днища	Высокая
Коррозия бортовой обшивки	14	Район переменной ватерлинии	Средняя
Деформации листов обшивки	12	Борт в районе грузовых трюмов	Низкая

С точки зрения механики разрушения, наиболее критичными являются именно усталостные трещины, инициируемые концентраторами напряжений в сварных соединениях.

Влияние технологических дефектов на усталостную прочность

Особое внимание уделено влиянию технологических дефектов постройки на снижение предела выносливости конструкций. Расчётные и экспериментальные данные показывают:

- Непровар в корне стыкового шва глубиной 2 мм (при толщине листа 8 мм) снижает предел выносливости на 35–40%, сокращая расчётный ресурс в 2–3 раза.
- Непровар в тавровом соединении набора с обшивкой даёт снижение предела выносливости на 45–50%, ресурс сокращается в 2,5–3 раза.
- Подрезы основного металла (канавки) глубиной более 0,5 мм снижают предел выносливости на 20–25% [7].

Таблица 2. Влияние технологических дефектов сварных соединений на снижение эксплуатационного ресурса корпусных конструкций

Тип дефекта	Характерная локализация	Снижение предела выносливости, %	Влияние на срок службы
Непровар в корне стыкового шва	Стыки обшивки, настила палубы	35-40	Сокращение в 2-3 раза
Непровар в тавровом соединении	Соединения набора с обшивкой	45-50	Сокращение в 2,5-3 раза
Подрезы основного металла	Все типы соединений	20-25	Сокращение в 1,5-2 раза
Поры и шлаковые включения	Протяженные сварные швы	15-20	Сокращение в 1,3-1,5 раза

Устранение данных дефектов на стадии строительства или ремонта является критически важной операцией для обеспечения нормативных межремонтных периодов.

Оптимизация конструктивных узлов с позиции минимизации концентраторов напряжений

Теоретические коэффициенты концентрации напряжений в традиционных узлах корпуса судна могут достигать значений 2,5–4,0. Предложены конструктивные решения, направленные на снижение локальных напряжений:

- Замена резкого окончания сварного шва в соединении флора с обшивкой на голубницу радиусом 75 мм. В данном случае расчёт методом конечных элементов показывает снижение максимальных напряжений со 180 МПа до 115 МПа, что соответствует уменьшению коэффициента концентрации на 36%.
- Увеличение радиуса закругления углов вырезов в стенках шпангоутов с 15 до 50 мм, что даёт снижение коэффициента концентрации на 28%.
- Выполнение плавного перехода толщины обшивки с уклоном 1:3 вместо ступенчатого. Данный переход позволяет снизить коэффициент концентрации на 42% [8].

Таблица 3. Снижение концентрации напряжений при оптимизации конструктивных узлов корпуса

Конструктивный узел	Традиционное решение	Оптимизированное решение	Снижение коэффициента концентрации, %
Окончание приварки флора к обшивке	Резкое окончание шва	Голубница радиусом 75 мм	36
Вырез в стенке шпангоута	Прямоугольный вырез с R=15 мм	Овальный вырез с R=50 мм	28

Переход толщины обшивки	Ступенчатый переход	Наклонный переход 1:3	42
Узел соединения переборки с палубой	Угловое соединение без книц	Кница радиусом 100 мм	38

Данные операции не требуют радикального изменения конструкции и могут быть реализованы как при новом строительстве, так и при модернизации старых эксплуатируемых судов.

Технологические аспекты повышения качества сварных соединений

Сравнительный анализ методов сварки демонстрирует преимущества механизированной и автоматической сварки под флюсом перед ручной дуговой. Производительность возрастает в 1,5–2 раза, при этом качество шва значительно выше за счёт стабильности параметров режима и снижения вероятности образования непроваров, пор и подрезов. Внедрение данных технологий на этапе постройки и ремонта является ключевым фактором повышения сопротивления усталости сварных соединений и, как следствие, увеличения межремонтного периода [9].

Таблица 4. Сравнительная характеристика современных методов сварки корпусных конструкций

Метод сварки	Производительность, кг наплавленного металла/ч	Качество шва	Сварочные деформации	Область применения
Ручная дуговая покрытыми электродами	1,5-2,0	Удовлетворительное	Значительные	Монтажные работы на стапеле
Полуавтоматическая в CO ₂	3,0-4,5	Хорошее	Умеренные	Универсальное применение
Автоматическая под флюсом	8,0-12,0	Высокое	Умеренные	Сварка плоских секций
Гибридная лазерно-дуговая	15,0-20,0	Очень высокое	Минимальные	Серийное производство

Технико-экономическое обоснование предложенных решений

Экономическая эффективность предлагаемых конструктивных и технологических решений оценивалась на примере типового сухогрузного теплохода внутреннего плавания. Согласно пункту 2.5.3 «Правил освидетельствования судов в процессе их эксплуатации (ПОСЭ)» Российского Классификационного Общества, промежуточное доковое освидетельствование должно проводиться перед третьим ежегодным освидетельствованием после первоначального или очередного с таким расчётом, чтобы период между доковым и очередным освидетельствованиями не превышал 36 месяцев. Таким образом, нормативный межремонтный интервал составляет 2,5 года [10].

В ходе докового освидетельствования выполняется осмотр подводной части корпуса, инструментальное измерение остаточных толщин связей днищевой и бортовой обшивки, дефектация сварных швов и, при необходимости, замена изношенных элементов конструкций. Продолжительность такого освидетельствования с учётом сопутствующих ремонтных работ составляет в среднем 35–40 суток, а его стоимость для рассматриваемого типа судна оценивается в 18,5 млн рублей.

Расчётный период эксплуатации принят равным 14 годам, что соответствует двум полным циклам очередного освидетельствования (5 лет + 5 лет) с добавлением одного межремонтного интервала (4 года) и позволяет наглядно сопоставить количество докований при различных стратегиях технического обслуживания.



В базовом варианте (строгое соблюдение норматива 2,5 года) за 14 лет требуется выполнить 6 промежуточных доковых освидетельствований. Внедрение комплекса проектно-технологических решений (оптимизация конструктивных узлов, снижение концентрации напряжений на 28–42%, применение современных методов сварки и эффективных систем антикоррозионной защиты) позволяет обоснованно увеличить межремонтный период (МРП) до 3,5 лет. За те же 14 лет количество доковых освидетельствований сокращается до 4:

- Прямая экономия на ремонтных работах (исключение двух доковых освидетельствований) составляет 37,0 млн руб.
- Сокращение суммарного простоя судна в доке на 80 суток обеспечивает дополнительный доход от эксплуатации в размере 100,8 млн руб. (исходя из суточной производительности и фрахтовой ставки на перевозку грузов) [11].
- Совокупный экономический эффект за 14 лет достигает 137,8 млн руб.

Таблица 5. Экономическая эффективность увеличения межремонтного периода с 2,5 до 3,5 лет

Показатель	Базовый вариант (МРП 2,5 года)	Оптимизированный вариант (МРП 3,5 года)	Изменение
Количество доковых ремонтов за 14 лет	6	4	-2
Стоимость доковых ремонтов, млн руб.	111,0	74,0	-37,0
Простой в ремонте за 14 лет, сутки	240	160	-80
Недополученный доход от простоя, млн руб.	302,4	201,6	-100,8
Суммарные затраты за 14 лет, млн руб.	413,4	275,6	-137,8

Дополнительные капитальные затраты, связанные с внедрением оптимизированных конструктивных решений и применением современных материалов на стадии постройки судна, оцениваются в 4,5–5,0% от стоимости строительства. При этом срок окупаемости дополнительных вложений составляет 2, 3 года, что при нормативном сроке службы судна 25–30 лет подтверждает высокую инвестиционную привлекательность предлагаемых мероприятий [12].

Таким образом, обоснованное увеличение интервала между доковыми освидетельствованиями, достигаемое за счёт снижения интенсивности износа корпусных конструкций, является экономически эффективным инструментом повышения рентабельности эксплуатации флота внутреннего плавания.

Заключение

Цель заключается в систематизации факторов, влияющих на межремонтный период, количественно обоснованных критериев выбора рациональных конструктивных и технологических параметров. Практическая значимость состоит в возможности применения предложенных рекомендаций на судостроительных и судоремонтных предприятиях для повышения долговечности как вновь строящихся, так и модернизируемых судов. Дальнейшие исследования в этом направлении целесообразно направить на создание цифровых двойников корпусных конструкций [13] и внедрение систем непрерывного мониторинга технического состояния на основе технологий промышленного интернета вещей [14].



Список литературы:

1. Бутузов, В.Г. Основы технической эксплуатации судов внутреннего плавания / В.Г. Бутузов, А.М. Васин. — СПб.: Судостроение, 2019. — 512 с.
2. Зайцев, В.А. Прочность корпуса судна / В.А. Зайцев. — СПб.: Судостроение, 2018. — 445 с.
3. Комаров В.С., Петрова Л.А. Анализ эффективности ведения эксплуатационной документации на судах речного флота // Эксплуатация морского транспорта. 2024. № 2 (101). С. 34–41.
4. Горбунов, И.С. Методы оценки остаточного ресурса корпусных конструкций / И.С. Горбунов, Е.П. Зайцев // Судостроение. — 2023. — №4. — С. 18-25.
5. Жуков, А.П. Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания / А.П. Жуков. — СПб.: РРР, 2021. — 512 с.
6. Волков, О.Д. Повреждения корпусных конструкций судов речного флота / О.Д. Волков // Речной транспорт (XXI век). — 2022. — №3. — С. 45-52.
7. Марков, С.А. Усталостная прочность сварных соединений судовых конструкций / С.А. Марков, Т.И. Воронина // Сварочное производство. — 2022. — №7. — С. 12-18.
8. Кудрин, О.И. Концентрация напряжений в корпусных конструкциях судов / О.И. Кудрин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — №2. — С. 78-86.
9. Семенов, Н.И. Современные методы сварки в судостроении / Н.И. Семенов, Л.К. Григорьев // Сварочное производство. — 2024. — №3. — С. 34-41.
10. Васин, А.М. Планово-предупредительная система ремонта судов / А.М. Васин. — СПб.: ГУМРФ, 2020. — 380 с.
11. Шапошников, Д.Л. Экономика судоходства на внутренних водных путях / Д.Л. Шапошников. — М.: Транспорт, 2024. — 356 с.
12. Юрченко, А.Н. Техничко-экономическая оценка проектов модернизации судов / А.Н. Юрченко, Е.В. Сидоров // Морская политика России. — 2023. — №6. — С. 78-85.
13. Григорьев, Н.Н. Цифровые технологии в судостроении и эксплуатации флота / Н.Н. Григорьев. — СПб.: СПбГМТУ, 2024. — 398 с.
14. Лебедев И.Н. Цифровые системы управления техническим состоянием флота: опыт внедрения и перспективы // Транспорт Российской Федерации. 2023. № 6 (109). С. 58–63.

