

АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПЛАВУЧИХ КРАНОВ

И. В. Никитаев , П. Н. Волский

Волжский государственный университет водного транспорта,
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

 inikitaev@bk.ru

В статье решается актуальная задача повышения достоверности оценки остаточного ресурса металлоконструкций плавучих кранов, длительно эксплуатирующихся под действием значительных статических и циклических нагрузок.

Цель статьи — разработка и обоснование методики оценки остаточного ресурса плавучих кранов на основе адаптированной математической модели поврежденной среды, учитывающей совместное действие механизмов мало- и многоциклового усталости при сложном непропорциональном нагружении.

Работа выполнена на основе комплексного подхода, включающего: обобщение фундаментальных положений механики поврежденной среды и теорий усталостного разрушения; математическое моделирование процессов накопления повреждений с использованием эволюционных уравнений, учитывающих кинематическое упрочнение и историю нагружения; конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций; численную верификацию модели на основе экспериментальных данных для конструкционных сталей; разработку двухуровневой методики, интегрирующей глобальный анализ конструкции и локальный анализ в опасных зонах. Обоснована необходимость учета явлений многоциклового усталости и нестационарного деформирования, которые не учитываются в традиционных упруго-расчетных схемах, что может приводить к неконсервативным оценкам.

В качестве методологической основы предлагается адаптированная математическая модель поврежденной среды, развитая в работах Ю. Г. Коротких и его научной школы. Данная модель, в отличие от классических подходов, учитывает историю нагружения, кинематическое упрочнение и совместное действие механизмов мало- и многоциклового усталости. Приведены результаты верификации модели на примере конструкционных сталей, демонстрирующие ее высокую точность при описании процессов накопления повреждений в условиях многоосного напряженного состояния.

Разработана и представлена комплексная методика оценки ресурса, интегрирующая конечно-элементный анализ глобальной конструкции плавучего крана и последующий локальный анализ напряженно-деформированного состояния с использованием адаптированной модели. Показано, что предлагаемый подход позволяет перейти от консервативных оценок к прогнозированию, основанному на моделировании реальной истории эксплуатационных нагрузок, и тем самым существенно повысить обоснованность решений по продлению срока службы ответственных инженерных объектов.

Ключевые слова: плавучие краны, усталостная долговечность, многоцикловая усталость, математическое моделирование, кинематическое упрочнение, сложное нагружение, поврежденность, конечно-элементный анализ

Для цитирования: Никитаев И. В., Волский П. Н. Адаптация модели многоциклового усталости для оценки ресурса металлоконструкции плавучих кранов. *Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»*. 2026. Т. 10, № 2. С. 49–56. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-49-56>. EDN: WUWAAQ.



© Никитаев И. В., Волский П. Н., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ADAPTATION OF THE HIGH-CYCLE FATIGUE MODEL FOR ASSESSING THE SERVICE LIFE OF METAL STRUCTURES OF FLOATING CRANES

I. V. Nikitaev , P. N. Volskiy

Volga State University of Water Transport,
Nesterov St., 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

 inikitaev@bk.ru

The article addresses the pressing issue of increasing the reliability of residual service life assessments for metal structures of floating cranes operating for long periods under significant static and cyclic loads.

The aim of the research is to develop and validate a methodology for estimating the residual service life of floating cranes based on an adapted mathematical model, considering the combined action of low- and high-cycle fatigue mechanisms under complex disproportionate loading.

The research is based on an integrated approach, including: analysis of the design features and operating conditions of floating cranes; A generalization of the fundamental principles of damaged environment mechanics and fatigue failure theories; mathematical modeling of damage accumulation processes using evolutionary equations that take into account kinematic hardening and loading history; finite element modeling of the stress-strain state of metal structures; numerical verification of the model based on experimental data for structural steels; and the development of a two-level methodology integrating global structural analysis and local analysis in hazardous areas. The authors prove the need to account for high-cycle fatigue and transient deformation phenomena, which are not considered in traditional elastic analysis models and can lead to non-conservative estimates.

The authors propose an adapted mathematical model of a damaged environment, developed in the works of Yu. G. Korotkikh and his scientific school as a methodological basis. This model, unlike classical approaches, considers the loading history, kinematic hardening, and the combined action of low- and high-cycle fatigue mechanisms. Moreover, the results of model verification using structural steels are presented, demonstrating its high accuracy in describing damage accumulation processes under multiaxial stress conditions.

The article demonstrates a comprehensive service life assessment methodology, integrating finite element analysis of the global floating crane structure and subsequent local stress-strain analysis using an adapted model. Therefore, the authors show that the proposed approach enables a transition from conservative estimates to predictions based on modeling the actual history of operational loads, thereby significantly improving the validity of decisions on extending the service life of critical engineering structures.

Keywords: floating cranes, fatigue life, multi-cycle fatigue, mathematical modeling, kinematic hardening, complex loading, damage, finite element analysis

For citation: Nikitaev I. V., Volskiy P. N. Adaptation of the high-cycle fatigue model for assessing the service life of metal structures of floating cranes. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2026;10(2):49–56. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-49-56>. EDN: WUWAAQ. (In Russ.).



© Nikitaev I. V., Volskiy P. N., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Плавучие краны являются ключевым элементом инфраструктуры портового хозяйства, судостроения и освоения шельфовых месторождений. Их металлоконструкции (стрелы, порталы, рамы) в процессе эксплуатации подвергаются воздействию комплекса значительных статических и переменных нагрузок, включая вес груза, собственный вес, динамические воздействия от качки, волнения и ветра. Характерной особенностью является многократное циклическое нагружение в течение длительного срока службы (30–40 лет и более), что обуславливает актуальность задачи оценки их усталостной долговечности.

Существующие нормативные методы оценки ресурса базируются на упругих расчетах и гипотез

линейного суммирования повреждений [1]. Однако они не учитывают реальную нелинейную кинетику напряженно-деформированного состояния и фактическую историю нагружения. Эту историю можно зафиксировать датчиками в процессе работы или, если прямое измерение невозможно, восстановить по методикам В. В. Болотина и Ю. Н. Работнова. Кроме того, стандартные расчеты игнорируют эффекты разупрочнения материала, вызванные характером операций (подъем, перемещение, монтаж), режимами работы (циклы нагружения, время удержания груза) и внешними условиями (ветер, волнение, течения) [2].

Современные подходы к прогнозированию усталостной долговечности при многоосном нагружении требуют учета всей истории нагружения и

нелинейных эффектов [3–5]. Это может приводить как к излишне консервативным оценкам, так и к опасным неконсервативным прогнозам [3, 4]. Особенностью эксплуатации многих плавучих кранов, особенно занятых на монтажных работах, является длительное статическое нагружение, когда конструкции находятся под действием нагрузок, близких к предельным, по несколько часов или даже суток. Именно в таких условиях проявляются реологические свойства материалов и процессы накопления усталостных повреждений.

Целью исследования является адаптация современной математической модели поврежденной среды для достоверной оценки их остаточного ресурса. Для достижения цели решаются следующие задачи: анализ специфики нагружения металлоконструкций плавучих кранов; обоснование выбора и адаптация математической модели, адекватно описывающей поведение материала в условиях сложного нагружения; верификация модели на основе экспериментальных данных; разработка комплексной методики оценки ресурса, интегрирующей глобальный и локальный анализ. В работе используются методы системного анализа, математического моделирования, конечно-элементного анализа, численного эксперимента и верификации расчетных данных с экспериментальными результатами.

Анализ нагружения и риски для металлоконструкций плавучих кранов

Металлоконструкции плавучих кранов работают в условиях сложного и объемного напряженного состояния. Элементы стрелы испытывают совместное действие сжатия, изгиба и скручивания; узлы поворотных платформ — кручение и изгиб; в зонах сопряжений возникает трехосное напряженное состояние. Рабочий цикл крана включает подъем, перемещение, длительное удержание груза и опускание, что приводит к знакопеременному и непропорциональному нагружению [1, 5].

Для материалов в таких условиях характерно проявление эффектов, аналогичных эффекту Баушингера: снижение сопротивления деформированию после изменения направления нагрузки. Это явление, известное как «разупрочнение при вращении вектора напряжений», приводит к резкому возрастанию скорости накопления повреждений после смены траектории нагружения, что не учитывается моделями с изотропным упрочнением, описанных в работах И. А. Волкова и Х. Сао [3, 6].

Доминирующими механизмами, определяющими ресурс таких конструкций, являются малоцикловая (МЦУ) и многоцикловая (МнЦУ) усталости. В окрестности предела текучести оба эти механизма обуславливают усталостную долговечность конструкционного материала, поэтому актуальным является их совместное моделирование, описанное в работе И. А. Волкова [5]. Долговечность при МЦУ в значительной степени определяется характеристиками процессов упругопластического деформирования и историей нагружения, тогда как МнЦУ является следствием микроскопической деформации, вызывающей совокупность необратимых процессов на микро- и мезоуровнях [7].

На рис. 1 схематично показаны основные элементы плавучего крана и типичные опасные зоны, где процессы накопления повреждений проходят с наиболее высокими темпами вследствие концентрации напряжений. Конструкция работает при циклическом комбинированном силовом нагружении.

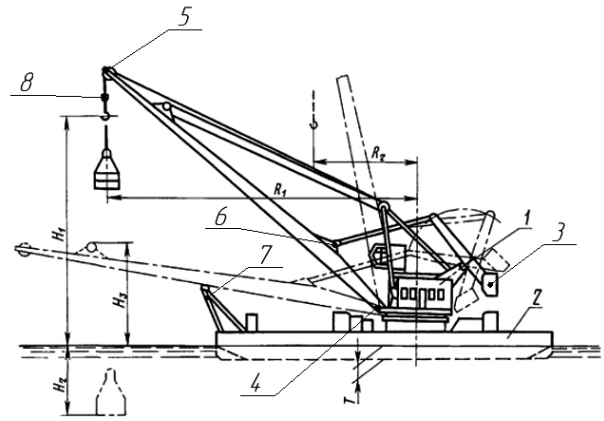


Рис. 1. Схематическое изображение плавучего крана и зон концентрации напряжений: 1 — рычажное устройство с гидравлическим приводом изменения вылета стрелы (опасная зона); 2 — понтон плавучего крана; 3 — противовес; 4 — узел крепления стрелы (опасная зона); 5 — зона крепления полиспаста крюка (опасная зона); 6 — узел соединения механизма изменения вылета стрелы со стрелой плавучего крана; 7 — стойка для укладки стрелы в транспортное положение; 8 — крюк
 Fig. 1. Schematic representation of a floating crane and stress concentration zones:

1 — lever device with a hydraulic drive for changing the boom extension (danger zone); 2 — pontoon of the floating crane; 3 — counterweight; 4 — boom attachment unit (danger zone); 5 — hook block attachment area (danger zone); 6 — connection unit of the boom extension change mechanism with the floating crane boom; 7 — stand for placing the boom in the transport position; 8 — hook
 Источник / Source: разработано авторами на основе [1] / compiled by the authors on the basis of [1]

Математическая модель для оценки совместного действия МЦУ и МнЦУ

Развиваемая в исследовании модель базируется на фундаментальных положениях, изложенных в трудах научной школы Ю. Г. Коротких [3, 4], обобщенная на случай совместного протекания МЦУ и МнЦУ [5] и дополненная для учета специфики эксплуатации плавучих кранов [7].

Определяющие соотношения упругопластического поведения

Ключевым положением модели является постулат аддитивности деформаций, согласно которому полная деформация складывается из упругой составляющей $e_{ij}^e, e_{ij}^{e'}$ и деформации ползучести $e_{ij}^c, e_{ij}^{c'}$:

$$e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^c, \dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^e + \dot{e}_{ij}^c. \quad (1)$$

Для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве напряжений вводится поверхность текучести в форме Мизеса и поверхность «памяти» [8]:

$$F = S_{ij} S_{ij} - C_p^2 = 0, \quad (2)$$

$$S_{ij}^c = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}^2, k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

$$F_p = \rho_{ij} \rho_{ij} - \rho_{\max}^2 = 0, \quad (4)$$

где S_{ij} — компонент девиатора напряжений с учётом кинематического упрочнения (или «активный девиатор напряжений»); k — индекс поверхности нагружения в многоуровневой модели кинематического упрочнения; σ'_{ij} — девиатор напряжений; ρ_{ij} — координаты центра поверхности текучести (параметры кинематического упрочнения); C_p — ради-

ус поверхности текучести, $\rho_{\max}$ — радиус поверхности памяти.

Эволюция радиуса поверхности текучести и ее центра описывается нелинейными уравнениями, учитывающими как монотонное, так и циклическое деформирование [3, 4]:

$$\dot{C}_p = \dot{\gamma} [q_x \Gamma(F_p) + (Q_s - C_p) H(F_p) a], \quad (5)$$

$$\dot{\rho}_{ij} = g_1 \dot{e}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \dot{\gamma}, \quad (6)$$

где q_x — параметр изотропного упрочнения при циклическом нагружении; Q_s — предельное значение радиуса поверхности текучести; a — параметр приближения скорости к предельному состоянию; g_1 — коэффициент прямого кинематического упрочнения; g_2 — коэффициент восстановления (релаксации); $\dot{e}_{ij}^p$ — тензор скорости пластических деформаций; $\dot{\gamma}$ — параметр, связанный с интенсивностью пластических деформаций; $H(F_p)$ и $\Gamma(F_p)$ — функции-переключатели, разделяющие процессы монотонного и циклического нагружений [5].

Эволюционные уравнения накопления повреждений

Накопление усталостных повреждений описывается эволюционными уравнениями для повреждений ω_p (от МЦУ) и ω_c (от МнЦУ) [9]:

$$\Delta \omega_i = \frac{(a_i + 1)}{(r_i + 1)} f_i(\beta) z_i^{(a_i)} (1 - \omega_i)^{(-r_i)} \Delta z_i, i = p, c, \quad (7)$$

где $f_i(\beta) = \exp(-k_i \beta)$ — функция параметра объема напряженного состояния $\beta = \sigma/\sigma_u$;

$$z_p = \frac{(W_p - W_a)}{(W'_p - W_a)}, z_c = \frac{(W_c[1 - f(\gamma)])}{W_c}, \quad (8)$$

где a_i, r_i — материалы параметры повреждаемости; z_p — нормированные параметры энергии деформирования; W_a — пороговая энергия; σ_u — интенсивность напряжений (Мизеса); σ — среднее (гидростатическое) напряжение; W_p и W_c — параметры, характеризующие накопленную энергию деформирования и определяемые как текущие удельные работы пластического и упругого деформирования соответственно: $W_p = \sum \sigma_{ij} \Delta e_{ij}^p, W_c = \sum \sigma_{ij} \Delta e_{ij}^c$; $f(\gamma)$ — функция, разделяющая вклад «опасной» и «неопасной» энергии при МнЦУ, которая имеет кусочно-заданный вид [9]:

$$\begin{cases} 1 & \gamma \leq 1 \\ 1 - (1 - b^*) \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma^* - 1} \right)^m & 1 < \gamma < \gamma^* \\ b^* & \gamma \geq \gamma^* \end{cases} \quad (9)$$

где $\sigma = \sigma_u / \sigma_u^y, \sigma_u$ — интенсивность напряжений; σ_u^y — предел выносливости; γ — относительный уровень напряжений; γ^* — граничное значение γ ; b^* — минимальное значение функции $f(\gamma)$; m — показатель степени, который определяет характер нелинейного снижения $f(\gamma)$ в переходной зоне между $\gamma = 1$ и $\gamma = \gamma^*$.

На рис. 2 показан график функции $f(\gamma)$, разделяющей области отсутствия усталостного разрушения ($\gamma \leq 1$), разрушения по механизму МнЦУ

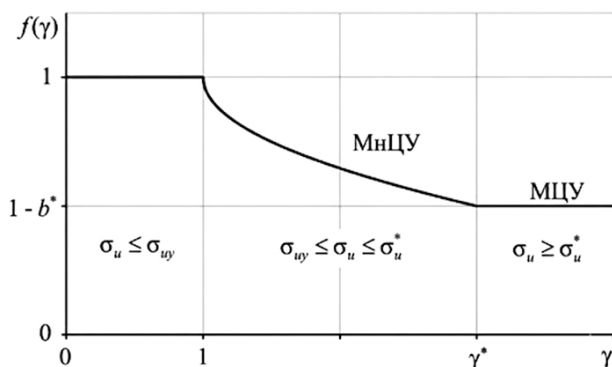


Рис. 2. Графическое представление функции $f(\gamma)$ [9]
Fig. 2. Graphical representation of the $f(\gamma)$ function [9]

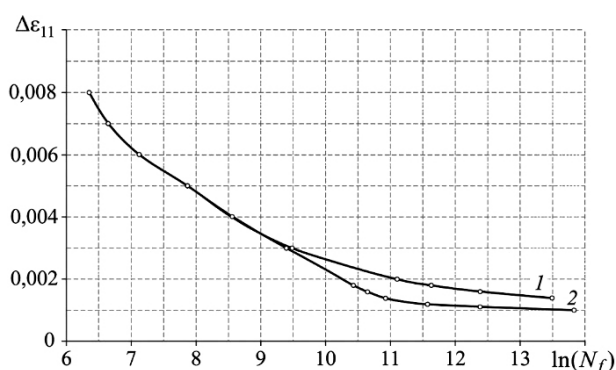


Рис. 3. Кривые усталости для стали 08X18H10T:

1 — расчет по модели МЦУ;
2 — расчет по модели МЦУ+МнЦУ [10]
Fig. 3. Fatigue curves for the 08X18H10T steel:
1 — calculation by the LCF model;
2 — calculation by the combined low-cycle and high-cycle fatigue (LCF+HCF) model [10]

($1 < \gamma < \gamma^*$) и совместного механизма МЦУ и МнЦУ ($\gamma \geq \gamma^*$).

Суммарная поврежденность определяется выражением:

$$\omega = \sum (\Delta \omega_p + \Delta \omega_c). \quad (10)$$

Критерием разрушения считается достижение поврежденностью критического значения ω_r .

Верификация модели и численные результаты

Верификация на примере конструкционных сталей

Верификация модели проведена на примере нержавеющей стали 08X18H10T ввиду того, что: для неё имеются полные экспериментальные данные по совместному действию мало- и многоциклового усталости; модель параметрическая и перенастраивается на любой конструкционный материал; дополнительно приведены ссылки на верификацию для сталей типа 09Г2С, ВСтЗ (по данным литературы [3]).

На рис. 3 приведены кривые усталости, рассчитанные отдельно для МЦУ и для совместного действия МЦУ и МнЦУ в сравнении с экспериментальными данными [10]. Видно, что учет механизма МнЦУ позволяет существенно улучшить соответствие расчета эксперименту в области высокочастотной усталости.

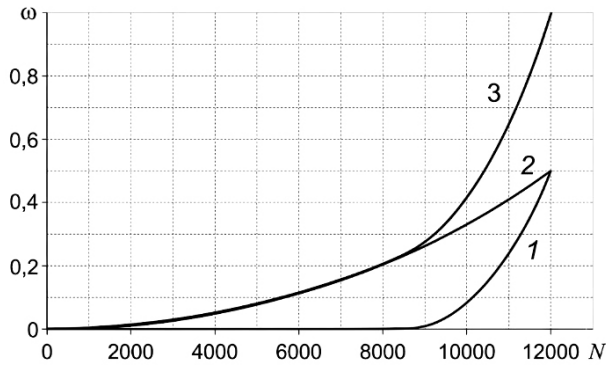


Рис. 4. Зависимость поврежденности от числа циклов при $\Delta e_{11} = 0,003$: 1 — ω_p ; 2 — ω_c ; 3 — суммарная ω [10]
 Fig. 4. Damage dependence on the number of cycles at $\Delta e_{11} = 0,003$: 1 — ω_p ; 2 — ω_c ; 3 — total ω [10]

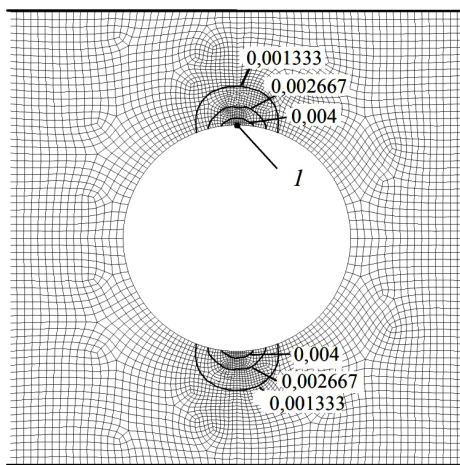


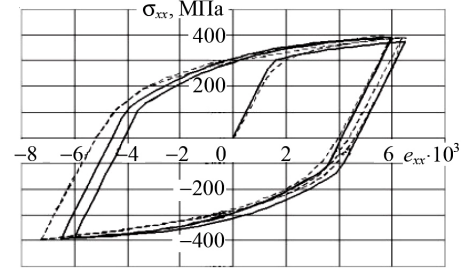
Рис. 5. Изолинии интенсивности пластических деформаций в полосе с отверстием [10]
 Fig. 5. Isolines of the plastic deformations intensity in a strip with a hole [10]

На рис. 4 показаны зависимости составляющих поврежденности от числа циклов при амплитуде деформации $\Delta e_{11} = 0,003$. Анализ показывает, что при данной амплитуде вклады механизмов МЦУ (ω_p) и МнЦУ (ω_c) соизмеримы, тогда как при меньших амплитудах ($\Delta e_{11} = 0,002$) доминирующим становится механизм МнЦУ [10]. Это иллюстрирует важность совместного учета обоих механизмов для широкого диапазона нагрузок.

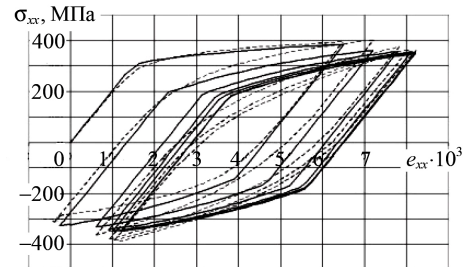
Анализ элемента конструкции с концентратором напряжений

Для демонстрации возможностей модели при анализе локальных зон рассмотрим задачу об усталостной долговечности полосы с круговым отверстием при знакопеременном нагружении [11]. На рис. 5 приведены изолинии интенсивности пластических деформаций e_u^p в конце этапа нагружения, полученные методом конечных элементов. Максимальное значение e_u^p наблюдается в точке I, которая является наиболее нагруженной зоной, где процессы поврежденности происходят наиболее интенсивно.

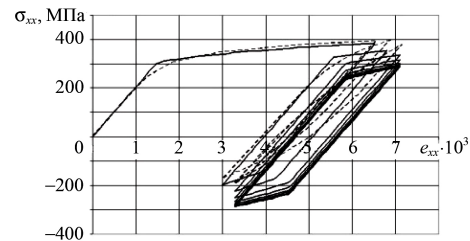
На рис. 6 для наиболее нагруженной зоны (точка I) показаны петли гистерезиса для осевого напряжения σ_{xx} и осевой деформации e_{xx} , рассчитанные



а)



б)



в)

Рис. 6. Петли гистерезиса в точке I для различных режимов нагружения (результаты численного моделирования): а) — симметричный цикл; б) — цикл с положительным средним напряжением; в) — пульсирующий цикл [10]
 Fig. 6. Hysteresis loops at the I point for different loading modes (results of numerical simulation): а) — symmetrical cycle; б) — cycle with positive mean stress; в) — pulsating cycle [10]

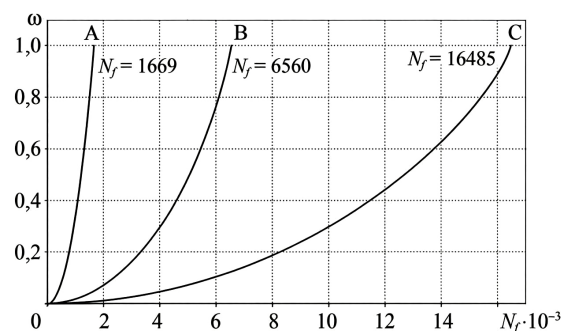


Рис. 7. Зависимость поврежденности от числа циклов для различных режимов нагружения [10]
 Fig. 7. Dependence of damage on the number of cycles for different loading modes [10]

для трех режимов нагружения (А — симметричный цикл; В — цикл с положительным средним напряжением; С — пульсирующий цикл).

Результаты, полученные с использованием определяющих соотношений механики поврежденной среды (сплошные линии) [11], качественно и количественно совпадают с данными, полученными

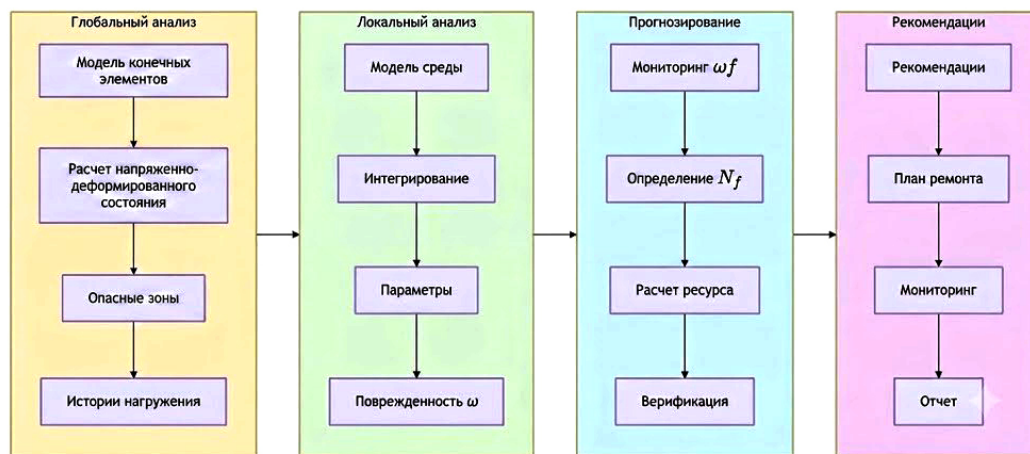


Рис. 8. Блок-схема комплексной методики оценки ресурса плавучих кранов [4, 9, 10]
Fig. 8. Block diagram of a comprehensive methodology for assessing the resource of floating cranes [4, 9, 10]

по другим моделям циклического упругопластического деформирования (штриховые линии), что подтверждает адекватность модели.

Интегрирование определяющих соотношений модели в точке I позволяет прогнозировать усталостную долговечность. На рис. 7 представлена зависимость величины поврежденности от числа циклов до разрушения для трех режимов нагружения. Видно, что долговечность существенно зависит от характера цикла: при симметричном нагружении (тип А) — $N_f = 1669$, при нагружении с положительным средним напряжением (тип В) — $N_f = 6560$, а при пульсирующем (тип С) — $N_f = 16485$ [11].

Комплексная методика оценки ресурса плавучих кранов

Предлагаемая двухуровневая методика развивает подход, впервые апробированный в работе А. С. Яблокова [9] и адаптированный авторами для плавучих кранов с учетом их конструктивных особенностей [11].

На основе адаптированной и верифицированной моделей разработана двухуровневая методика оценки остаточного ресурса металлоконструкций плавучих кранов. На рис. 8. показана блок-схема комплексной методики оценки ресурса плавучих кранов. Методика делится на четыре этапа:

1. Глобальный анализ. С помощью метода конечных элементов (в средах ANSYS, Abaqus) выполняется расчет напряженно-деформированного состояния крана при наихудших, но реальных сценариях эксплуатации, учитывающих максимальные грузы, неблагоприятные условия качки и волнения. Выявляются «опасные точки» с максимальными эквивалентными напряжениями или сложной историей изменения компонент тензора напряжений (например, зоны, аналогичные точке I на рис. 5). Для этих точек извлекаются временные ряды (истории нагружения), содержащие информацию об изменении всех шести компонент тензора напряжений на протяжении моделируемого периода [11].

2. Локальный анализ. Полученные истории нагружения передаются в качестве входных данных в специализированный программный комплекс (например, «Expmoel» [9]), в алгоритмы которого заложена рассматриваемая модель нестационарной ползучести и усталости. В этом комплексе расчет ведется не для всей конструкции, а для элементарного объема материала, находящегося в опасной

точке. Такой подход позволяет с высокой точностью, без затрат вычислительных ресурсов на моделирование всей конструкции, проинтегрировать уравнения модели для реальной, сложной истории нагружения. В результате определяются кинетика деформаций, эволюция параметров упрочнения и, что наиболее важно, кинетика параметра поврежденности ω .

3. Прогнозирование. На основании данных, полученных в результате локального анализа (кинетика параметра поврежденности ω , эволюция параметров упрочнения), выполняется прогнозирование остаточного ресурса крана. Определяются критические пороги ω , превышение которых сигнализирует о необходимости вмешательства. Учитываются накопленные повреждения, неоднородность материала и эффекты старения. Вычисляется остаточный ресурс конструкции (в циклах или годах эксплуатации) до наступления критического уровня поврежденности [13].

4. Рекомендации. На основе результатов прогнозирования формируется комплекс мер по обеспечению надежности крана. Выделяются наиболее критичные зоны и формируются этапы работ по обеспечению безопасной эксплуатации плавучего крана. Составляется план ремонта плавучего крана. План учитывает критичность дефектов и экономическую эффективность. Мониторинг включает в себя разработку системы постоянного контроля ключевых параметров (напряжение, деформация, уровень коррозии). Подготавливаются отчеты с детализацией расчетов, графиками изменения поврежденности, фотофиксацией дефектов и рекомендациями по срокам выполнения работ. Отчеты предоставляются эксплуатирующей организации и надзорным органам.

Остаточный ресурс элемента определяется как время (или число циклов), за которое параметр поврежденности достигает своего критического значения ω_r , соответствующего образованию макротрещины.

Преимущество предлагаемой методики перед традиционными подходами заключается в ее физической обоснованности. Вместо гипотезы линейного суммирования повреждений, не учитывающей нелинейность и взаимовлияние различных циклов нагружения, используется прямое математическое моделирование процесса деградации материала под действием конкретной эксплуатационной истории.

Это позволяет учитывать такие тонкие эффекты, как разупрочнение при изменении траектории нагружения, влияние периода длительной статической выдержки на последующее циклическое поведение и зависимость скорости накопления повреждений от вида напряженного состояния, что соответствует современным мировым тенденциям в прогнозировании многоосной усталости [14–16].

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует необходимость учета явлений многоциклового усталости и истории нагружения при оценке ресурса плавучих кранов. Адаптированная математическая модель поврежденной среды, учитывающая совместное действие механизмов МЦУ и МнЦУ, кинематическое упрочнение и сложное непропорциональное нагружение, показала свою адекватность и точность при верификации на широком классе экспериментов.

Разработанная двухуровневая методика оценки ресурса, интегрирующая конечно-элементный анализ глобальной конструкции и последующее детальное моделирование поведения материала в опасных зонах, представляет собой мощный инструмент для обоснования решений по продлению срока службы. Этот подход позволяет перейти от консервативных и зачастую необоснованных нормативных оценок к прогнозированию, базирующемуся на физическом моделировании реальных процессов деформирования и накопления повреждений в материале.

Внедрение предлагаемой методики в практику экспертизы промышленной безопасности и обследования плавучих кранов позволит существенно повысить надежность их эксплуатации, предотвратить аварии и оптимизировать затраты на ремонт и модернизацию, обеспечивая тем самым долговечность и экономическую эффективность этих уникальных инженерных объектов.

Список источников / References

1. Волков И. А., Игумнов Л. А., Тарасов И. С. Оценка усталостной долговечности материалов и конструкций при малоцикловом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10, № 1. С. 17–30. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2017.10.1.2>. EDN: ZEYCOZ.

Volkov I. A., Igumnov L. A., Tarasov I. S. Evaluating fatigue life of materials and structures under low-cycle loading. *Computational Continuum Mechanics*. 2017;10(1):17–30. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2017.10.1.2>. EDN: ZEYCOZ. (In Russ.).

2. Чернявский О. Ф., Чернявский А. О. Описание деформационных свойств материалов при расчетах малоциклового усталости // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2021. Т. 13, № 3. С. 53–61. <https://doi.org/10.14529/mmph210307>. EDN: GGRBFL.

Cherniavsky O. F., Cherniavsky A. O. Description of the deformation properties of materials in low-cycle fatigue calculations. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*. 2021;13(3):53–61. <https://doi.org/10.14529/mmph210307>. EDN: GGRBFL. (In Russ.).

3. Волков И. А., Коротких Ю. Г. Уравнения состояния вязкоупруго-пластических сред с повреждениями. Москва: Физматлит, 2008. 424 с. ISBN 978-5-9221-0965-9. EDN: MUWRUX.

Volkov I. A., Korotkikh Yu. G. *Urnvneniya sostoyaniya vyzkouprugo-plasticheskikh sred s-povrezhdeniyami*. Moscow, 2008. 424 p. ISBN 978-5-9221-0965-9. EDN: MUWRUX. (In Russ.).

4. Волков И. А., Игумнов Л. А., Казаков Д. А. [и др.]. Определяющие соотношения нестационарной ползучести при

сложном напряженном состоянии // Проблемы прочности и пластичности. 2016. Т. 78, № 4. С. 436–451. EDN: XEGSPD.

Volkov I. A., Igumnov L. A., Kazakov D. A. [et al.]. Defining relations of transient creep under complex stress state. *Problems of Strength and Plasticity*. 2016;78(4):436–451. EDN: XEGSPD. (In Russ.).

5. Волков И. А., Игумнов Л. А., Казаков Д. А. [и др.]. Модель поврежденной среды для описания длительной прочности конструкционных материалов (металлов и их сплавов) // Проблемы прочности и пластичности. 2017. Т. 79, № 3. С. 285–300. EDN: ZGUZCB.

Volkov I. A., Igumnov L. A., Kazakov D. A. [et al.]. A damaged medium model for describing the process of long-term strength of structural materials (metals and their alloys). *Problems of Strength and Plasticity*. 2017;79(3):285–300. EDN: ZGUZCB. (In Russ.).

6. Cao X., Zou L., Lu Ch. Augmentation method of fatigue data of welded structures based on physics-informed CTGAN. *Fracture and Structural Integrity*. 2025;72:162–178. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.72.12>. EDN: VUUYWV.

7. Коструб В. А., Мирошников А. А. Анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции консольного ферменного крана // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2022. № 7 (61). С. 81–84. EDN: UGWFUT.

Kostrub V. A., Miroshnikov A. A. Analysis of stress-strain state of steel structure of cantilever truss crane. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dallya*. 2022;7(61):81–84. EDN: UGWFUT. (In Russ.).

8. Волков И. А., Игумнов Л. А., Казаков Д. А. [и др.]. Уравнения состояния нестационарной ползучести при сложном нагружении // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59, № 3 (349). С. 191–202. <https://doi.org/10.15372/PMTF20180320>. EDN: URHZBY.

Volkov I. A., Tarasov I. S., Igumnov L. A. [et al.]. State equations of unsteady creep under complex loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2018;59(3):191–202. <https://doi.org/10.15372/PMTF20180320>. EDN: URHZBY. (In Russ.).

9. Яблоков А. С., Волков А. И., Шишулин Д. Н. Оценка напряженно-деформированного состояния и усталостной долговечности металлоконструкции плавучего крана КПЛ 16-30 по его фактической эксплуатационной нагруженности // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2017. № 52. С. 56–70. EDN: ZGPQJD.

Yablokov A. S., Volkov A. I., Shishulin D. N. Evaluation of the stress-strain state and the fatigue life of metal floating crane KPL 16-30 on its actual, operational loading. *Russian Journal of Water Transport*. 2017;52:56–70. EDN: ZGPQJD. (In Russ.).

10. Волков И. А., Ереев М. Н., Коротких Ю. Г., Тарасов И. С. Модель поврежденной среды для оценки долговечности конструкций при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5, № 1. С. 54–60. EDN: OWGKBL.

Volkov I. A., Ereev M. N., Korotkikh Yu. G., Tarasov I. S. A model of damaged medium for evaluating the durability of structures subjected to combined low- and high-cycle fatigue loading. *Computational Continuum Mechanics*. 2012;5(1):54–60. EDN: OWGKBL. (In Russ.).

11. Волков И. А., Игумнов Л. А. Введение в континуальную механику поврежденной среды: монография. Москва: Физматлит, 2017. 304 с.

Volkov I. A., Igumnov L. A. *Vvedeniye v kontinual'nyuyu mekhaniku povrezhdennoy sredy*. Moscow, 2017. 304 p. (In Russ.).

12. Игумнов Л. А., Волков И. А., Шишулин Д. Н., Белов А. А. Методология обоснования ресурса ответственных инженерных объектов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2026. № 1. С. 215–231. <https://doi.org/10.31857/S1026351926010115>. EDN: ZGFUJP.

Igumnov L. A., Volkov I. A., Shishulin D. N., Belov A. A. Methodology for substantiating the resource of responsible engineering facilities. *Mechanics of Solids*. 2026;1:215–231. <https://doi.org/10.31857/S1026351926010115>. EDN: ZGFUJP. (In Russ.).

13. Равин А. А., Хруцкий О. В. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2018. № 1. С. 33–47. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2018-1-33-47>. EDN: YOQFAU.

Ravin A. A., Khrutsky O. V. Engineering methods for predicting the residual resource of the equipment. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2018;1:33–47. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2018-1-33-47>. EDN: YOQFAU. (In Russ.).

14. Yu W., Sun X., Chen X. From mechanism empirical to physics-informed: a comprehensive review of multiaxial non-proportional low-cycle fatigue life prediction. *International Journal of Structural Integrity*. 2025;16(5):1048–1091. <https://doi.org/10.1108/IJSI-01-2025-0008>.

15. Ge X., Zhang C., Liu G. [et al.]. A Fatigue Damage Accumulation Model Considering Load Interaction and Material Parameters Under Variable Load Conditions. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2025;48(6):2518–2539. <https://doi.org/10.1111/ffe.14624>.

16. Lopez Leon J. M., O’Nora N., Gordon A. P. A Review of Multiaxial Fatigue Life Predictions Methods and a Novel Graphical User Interface. *ASME Turbo Expo 2025: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. 2025;V008T24A011. <https://doi.org/10.1115/GT2025-154093>.

Вклад авторов:

И. В. Никитаев. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, расчет бесстыкового пути на устойчивость, оценка результатов разработанной системы на основе современных методов компьютерного зрения и глубокого обучения, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

П. Н. Волский. Поиск способа интеграции разработанной системы в существующую архитектуру, проведение обзора, разработка системы и анализ результатов.

Authors’ contribution:

Igor V. Nikitaev. Formulation of the research aim and objectives, analysis of the problem, stability calculation of continuous welded rail track, evaluation of the developed system results based on modern computer vision and deep learning methods, formulation of conclusions, preparation of the text of the article.

Petr N. Volskiy. Exploring integration methods for the developed system into the existing architecture, conducting a review, system development, analysis of results.

Информация об авторах:

НИКИТАЕВ Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные машины и машиноремонт» Волжского государственного университета водного транспорта (ВГУВТ), г. Нижний Новгород. SPIN-код: 3166-1991

AuthorID (РИНЦ): 827332

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0843-479X>

e-mail: inikitaev@bk.ru

ВОЛСКИЙ Петр Николаевич, аспирант, ассистент кафедры «Подъемно-транспортные машины и машиноремонт» ВГУВТ, г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 1114-8408

AuthorID (РИНЦ): 1333631

e-mail: pitter.volski@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 24.02.2026; одобрена после рецензирования 27.04.2026; принята к публикации 22.06.2026.

Information about the authors:

NIKITAEV Igor Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Lifting and Transport Machinery and Machine Repair Department, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod.

SPIN-code: 3166-1991

AuthorID (RSCI): 827332

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0843-479X>

e-mail: inikitaev@bk.ru

VOLSKIY Petr Nikolayevich, Postgraduate, Assistant of the Lifting and Transport Machinery and Machine Repair Department, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod.

SPIN-code: 1114-8408

AuthorID (RSCI): 1333631

e-mail: pitter.volski@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 24.02.2026; approved after reviewing 27.04.2026; accepted for publication 22.06.2026.