

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MACHINE BUILDING



УДК 621.86/.87

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-158-169>

Методика определения группы классификации стреловых кранов зарубежных фирм при оценке их технического состояния в период действующих санкций



EDN: LOEFTJ

Д.Н. Симонов², Р.В. Хван¹ , Э.А. Панфилова¹ , Л.А. Терновской¹ ¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация² ООО ИКЦ «Мысль» НГТУ, г. Новочеркасск, Российская Федерация✉ khvanroman@yandex.ru

Аннотация

Введение. На текущий момент в Российской Федерации более 7 000 юридических лиц и индивидуальных предпринимателей эксплуатируют опасные производственные объекты (ОПО) и свыше 90 тысяч подъемных сооружений, включая грузоподъемные краны, подъемники и лифты. Периодически на этих сооружениях регистрируются серьезные аварии, приводящие к несчастным случаям и гибели людей, что подчеркивает значимость вопроса обеспечения безопасности на грузоподъемных кранах. При этом санкции, введенные зарубежными компаниями — производителями импортных кранов, установленных в портах, усложняют их дальнейшую безопасную эксплуатацию, поскольку многие из них превышают или приближаются к предельному сроку службы. В соответствии с нормативными правовыми актами Российской Федерации, для их дальнейшей эксплуатации необходимо проведение экспертизы промышленной безопасности. Существующие исследования, посвященные оценке технического состояния грузоподъемных машин, в основном затрагивают вопросы остаточного ресурса. Однако анализ показывает, что особенности оценки состояния кранов зарубежных производителей, включая их фактические нагрузки в соответствии с FEM¹, остаются недостаточно исследованы. Это приводит к несоответствию фактической и паспортной загрузки, что создает повышенные риски аварийных ситуаций. Цель данного исследования заключается в разработке методики определения фактической группы классификации (режима) стреловых кранов зарубежных компаний. Эта методика позволит произвести объективную оценку технического состояния кранов в процессе экспертизы промышленной безопасности. Также в рамках работы будет проведена проверка разработанной методики на конкретном примере.

Материалы и методы. Оценка базировалась на статистических данных, собранных последние 27 лет. Исследование проводилось на основе систематизации типовых повреждений кранов, выявленных в ходе экспертизы промышленной безопасности. Использовались статистические данные о количестве кранов и авариях, собранные из открытых источников. Количество кранов за период наблюдения составило 254 250 единиц, а среднее число аварий — 42,29. Это дало возможность рассчитать фоновую вероятность аварий, равную $1,66 \cdot 10^{-4}$, что позволило выявить превышение допустимого значения вероятности разрушения, которое составило $2 \cdot 10^{-3}$ против установленного нормативного уровня 10^{-4} . Данные результаты стали основанием для проведения анализа технического состояния кранов и доработки методики оценки рисков. Непосредственно анализ технического состояния кранов основывался на исследовании функций загрузки, которые зависят от массы груза и вылета стрелы, рассматриваемых как случайные величины. Для этого был произведен сбор и обработка первичной информации в форме гистограмм распределения перемещаемых масс грузов и вылетов стрелы испытываемых кранов. Эти данные использовались для расчета остаточного ресурса по наработке на усталость ресурсопределяющего узла металлоконструкции и вероятности разрушения конструкции. При статистической обработке данных применялись методики, позволяющие формализовать выводы об уровне риска эксплуатации кранов, основанные на конкретных численных значениях вероятности аварий и величины ущерба, учитывающие экономические и социальные аспекты.

¹ F.E.M. 1.001–1998. Правила проектирования подъёмных устройств. VBOOK.PUB. URL: <https://vbook.pub/documents/fem-1001-3-edition-revised-1998101-rules-for-the-design-of-hoisting-appliances-5wglvlzj78o7> (дата обращения: 24.02.2025).

© Симонов Д.Н., Хван Р.В., Панфилова Э.А., Терновской Л.А., 2025

Результаты исследования. Для оценки технического состояния стреловых кранов зарубежных фирм разработана методика, позволяющая определить фактическую группу классификации (режим). Методика включает расчет коэффициента распределения нагрузок (K_p) через грузовые моменты, оценку остаточного ресурса по характеристическому числу, расчет напряжений на усталость для ресурсопределяющего узла, определение вероятности разрушения конструкции, а также оценку уровня риска аварии. В статье представлен пример применения данной методики на конкретном стреловом кране. Для крана с расчетным $K_p = 0,30$ (группа А6) и нормативным характеристическим числом равным 125 000, фактическое характеристическое число составляет 179 323, что указывает на исчерпание ресурса. Проверочный расчет напряжений на усталость опорного контура показал близость к пределу прочности. Значение вероятности разрушения с учетом статистических данных о загруженности крана превысило допустимое значение.

Обсуждение и заключение. Анализ результатов на конкретном примере показал, что превышение паспортной группы классификации режима работы крана и, как следствие, превышение назначенного ресурса его конструктивных элементов приводит к значительному увеличению риска аварий. В результате экспертизы установлено, что фактическая группа классификации режима работы крана превышает паспортное значение и составляет А6 вместо А5. Разработанная методика оценки фактической группы классификации режима работы стреловых кранов зарубежных производителей позволит существенно снизить вероятность разрушения конструкций и уровень аварийности в процессе экспертизы промышленной безопасности. При этом рекомендуется при расчетах использовать фоновое значение вероятности аварии грузоподъемного крана $1,66 \cdot 10^{-4}$ и среднее значение материального ущерба 73,2 млн рублей.

Ключевые слова: стреловые краны, экспертиза промышленной безопасности, вероятность разрушения, группа классификации, ресурс

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность коллективу ООО ИКЦ «Мысль» НГТУ г. Новочеркасска за предоставленную возможность использовать данные экспертизы промышленной безопасности стреловых кранов, а также за доступ к статистической базе данных типовых повреждений кранов.

Для цитирования. Симонов Д.Н., Хван Р.В., Панфилова Э.А., Терновской Л.А. Методика определения группы классификации стреловых кранов зарубежных фирм при оценке их технического состояния в период действующих санкций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(2):158–169. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-158-169>

Original Empirical Research

Methodology for Determining the Classification Group of Jib Cranes of Foreign Companies when Assessing Their Technical Condition during Current Sanctions

Dmitry N. Simonov², Roman V. Khvan¹ , Elvira A. Panfilova¹ , Leonid A. Ternovskoi¹ 

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

² “Mysl” Engineering and Consulting Center, Novocherkassk, Russian Federation

✉ khvanroman@yandex.ru

Abstract

Introduction. Currently, more than 7,000 legal entities and individual entrepreneurs in the Russian Federation operate hazardous production facilities (HPFs) and over 90,000 lifting facilities, including cranes, hoists, and elevators. Periodically, serious accidents leading to injuries and deaths are recorded at these facilities, emphasizing the importance of ensuring safety on lifting cranes. However, sanctions against imported cranes installed in ports make it difficult to ensure their safe operation, as many of these cranes exceed or approach the end of their service life. According to the regulatory legal acts of the Russian Federation, an industrial safety inspection is required for further operation of these cranes. The existing studies on the assessment of technical condition of lifting machines primarily focus on issues related to residual life. However, the analysis reveals that the features of evaluating the condition of cranes manufactured by foreign companies, in particular, their actual loads as determined by FEM², have not been thoroughly investigated. This discrepancy between actual and specified loading leads to increased risk of accidents. The aim of this research is to develop a methodology for determining the actual classification group of jib cranes produced by foreign companies, which will allow for an objective assessment of their technical condition during the industrial safety inspections, as well as verifying the developed methodology through a specific example.

² F.E.M. 1.001–1998. *Rules for the Design of Hoisting Appliances*. VBOOK.PUB. URL: <https://vbook.pub/documents/fem-1001-3-edition-revised-19981041-rules-for-the-design-of-hoisting-appliances-5wglvlzj78o7> (accessed: 24.02.2025).

Materials and Methods. The assessment was based on statistical data collected over the past 27 years. The study was conducted through a systematization of typical damages to cranes identified during industrial safety inspections. Statistical data on the number of cranes and accidents were collected from open sources. During the observation period, there were 254,250 cranes, and the average number of accidents was 42.29, which allowed us to calculate a background probability of accidents of $1.66 \cdot 10^{-4}$. This allowed us to identify an excess in the permissible destruction probability, which was 2×10^{-3} , compared to the established regulatory level of 10^{-4} . Based on this, we analyzed the technical condition of cranes and refined the risk assessment methodology. The direct analysis of the technical condition of cranes was based on the study of loading functions, which depended on the weight of the load and the boom outreach, considered as random variables. For this purpose, we collected and processed primary information in the form of histograms of the distribution of transported cargo masses and boom outreach of the tested cranes. We used these data to calculate the remaining fatigue life of the resource-determining component of the metal structure and the probability of structural failure. Statistical data processing techniques were used to formalize conclusions about the risk level of crane operation based on specific numerical values of accident and damage probabilities, taking into account economic and social factors.

Results. To assess the technical condition of jib cranes manufactured by foreign companies, a methodology was developed to determine the actual classification group. The methodology included calculating the load distribution coefficient (K_p) through load moments, estimating the residual resource by a characteristic number, calculating fatigue stresses for a resource-determining unit, determining the probability of structural failure, and assessing the risk of an accident. The article provides an example of the application of this technique to a specific jib crane. For a crane with design $K_p = 0.30$ (group A6) and a standard characteristic number of 125,000, the actual characteristic number was 179,323, indicating that service life had been exhausted. Verification calculation of fatigue stresses in the reference contour showed close proximity to the ultimate strength. The value of the probability of destruction, considering the statistical data on the crane load, exceeded the permissible value.

Discussion and Conclusion. The analysis of the results, using a specific example, showed that exceeding the passport classification of the crane's operating mode, and as a result, exceeding the assigned resources of its structural components, led to a significant increase in the risk of accidents. Based on the examination, it was found that the actual classification group of the crane's operating mode exceeded the passport value and amounts to A6 instead of A5. The developed methodology for assessing the actual classification group of the operating mode of jib cranes from foreign manufacturers allows for a significant reduction in the likelihood of structural failure and accident rate during industrial safety inspections. At the same time, it is recommended to use the background probability of a lifting crane accident of $1.66 \cdot 10^{-4}$ and the average value of material damage of 73.2 million rubles in calculations.

Keywords: jib cranes, industrial safety inspection, probability of destruction, classification group, service life

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the team of the Engineering and Consulting Center “Mysl” in Novocherkassk for the opportunity to use the data from the industrial safety inspection of jib cranes and the statistical database on typical damage to cranes.

For citation. Simonov DN, Khvan RV, Panfilova EA, Ternovskoi LA. Methodology for Determining the Classification Group of Jib Cranes of Foreign Companies when Assessing Their Technical Condition during Current Sanctions. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(2):158–169. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-158-169>

Введение. В настоящее время на территории Российской Федерации зарегистрировано 51 670 единиц поднадзорных опасных производственных объектов, эксплуатирующих более 284 тысяч подъемных сооружений, среди которых 224 363 грузоподъемных крана. Важно отметить, что 51,2 % эксплуатируемых подъемных сооружений уже отработало нормативный срок службы.

В 2023 году на подъемных сооружениях было зафиксировано 30 аварий. Анализ причин этих происшествий за последние несколько лет показал, что основными факторами их возникновения являются: осуществление производственного контроля на низком уровне [1], эксплуатация неисправного подъемного сооружения, а также неудовлетворительная организация проведения осмотров, технического обслуживания и плановых ремонтов подъемных сооружений [2].

Санкции, введенные странами-производителями, затронули зарубежные грузоподъемные краны, которые в основном установлены в морских и речных портах. У значительной части импортных грузоподъемных кранов срок службы подошел к критической точке или даже превысил установленный нормативный [3]. Для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации этих устройств в соответствии с требованиями нормативных правовых актов Российской Федерации необходимо проведение экспертизы промышленной безопасности. Это обязательное действие позволяет гарантировать надежность и безопасность эксплуатации кранов, а также соблюдение всех дей-

ствующих стандартов и норм. Группы классификации, классы использования и режимы нагружения указанных кранов приняты на основе международных европейских норм FEM 1.001-1998³ «Правила проектирования подъемных средств», модификации которых эквивалентны российскому стандарту ГОСТ 34 017–2016.⁴ Сравнительный анализ этих нормативных документов показал, что согласно FEM⁵ в паспортах кранов указана загрузка Q2, тогда как фактическая нагрузка соответствует Q3. Это приводит к превышению значения группы классификации и повышенному риску возникновения аварий.

Особенностью эксплуатации таких кранов в условиях наложенных санкций со стороны государств-производителей является прекращение или значительное ограничение поставок оборудования, запасных частей и агрегатов к ним, а также нарушение контактов для получения консультационных услуг по вопросам эксплуатации кранов. К тому же наблюдается прекращение обслуживания техники специалистами от фирм-поставщиков, дистанционного мониторинга состояния оборудования и обновления программных продуктов, обеспечивающих безопасную эксплуатацию кранов.

Стреловые краны, согласно законодательству РФ № 116 ФЗ⁶, относятся к потенциально опасным объектам IV класса опасности, которые должны соответствовать нормированным требованиям безопасности, таким как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость [4, 5].

В ходе выполнения плановых экспертных обследований кранов установлено наличие отдельных ресурсопределяющих (ресурсоограничивающих) узлов и элементов металлоконструкций [6]. Повреждение (выработка ресурса) таких узлов может привести к полному разрушению конструкции. Например, произошли аварии, связанные с: разрушением узла крепления рейки механизма изменения вылета стрелы у портального крана типа «Альбатрос» (рис. 1), разрушением узла крепления аутригеров у башенного крана (рис. 2), разрушением механизма подъема у портального крана (рис. 3).



а)



б)

Рис. 1. Авария портального крана типа «Альбатрос» по причине разрушения узла крепления рейки механизма изменения вылета стрелы: а — общий вид; б — место разрушения

³ F.E.M. 1.001–1998. *Правила проектирования подъемных устройств*. VBOOK.PUB. URL: <https://vbook.pub/documents/fem-1001-3-edition-revised-1998101-rules-for-the-design-of-hoisting-appliances-5wglvlzj78o7> (дата обращения: 24.02.2025).

⁴ ГОСТ 34 017–2016. *Краны грузоподъемные*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200144610?ysclid=mb95dc232z408543082> (дата обращения: 24.02.2025).

⁵ Там же.

⁶ *О промышленной безопасности опасных производственных объектов*. Федеральный закон № 116 ФЗ от 21.07.1997. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9046058?ysclid=mb95ftxllk548884359> (дата обращения: 24.02.2025).

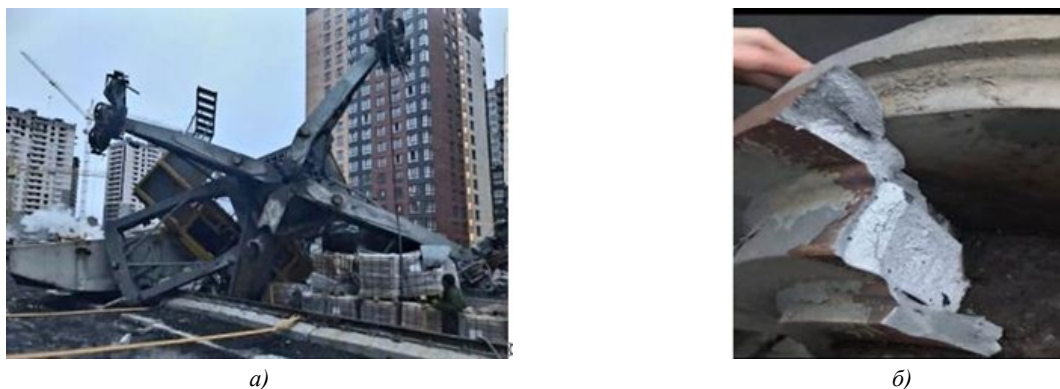


Рис. 2. Авария башенного крана по причине разрушения узла крепления аутригеров (выносных опор) ходовой рамы:
а — общий вид; б — место разрушения



Рис. 3. Авария портального крана по причине разрушения механизма подъема:
а — до аварии; б — после аварии

Описанные аварии объединены общей причиной [7], а именно, превышением группы классификации (режима) крана паспортного значения, что, в свою очередь, приводит к превышению назначенного ресурса крана в целом, а также ресурсоопределяющих конструктивных элементов крана в частности.

Актуальной представляется задача проведения объективной оценки технического состояния стрелковых кранов в процессе экспертизы промышленной безопасности. Поэтому целью данной работы стала разработка методики определения фактической группы классификации (режима) стреловых кранов зарубежных компаний и проверка разработанной методики на конкретном примере.

Материалы и методы. Краны типа «Готвальд» имеют группу классификации режима работы крана А5 или А6 с рекомендованными параметрами по международным европейским нормам FEM 1.001–1998⁷ [8]:

- группа классификации крана А;
- группа классификации механизмов М;
- группа классификации иных компонентов Е;
- класс использования U для каждой группы;
- режим нагружения Q для каждой группы.

При данных параметрах должен быть реализован определенный срок службы узлов и механизмов крана [9], выраженный в моточасах (таблица 1).

⁷ F.E.M. 1.001–1998. Правила проектирования подъёмных устройств. VBOOK.PUB. URL: <https://vbook.pub/documents/fem-1001-3-edition-revised-1998101-rules-for-the-design-of-hoisting-appliances-5wglvlzj78o7> (дата обращения: 24.02.2025).

Таблица 1

Диаграмма срока службы для кранов типа НМК, HSK

Компоненты	Рабочие часы	Срок службы компонентов								
		5 000	10 000	15 000	20 000	25 000	30 000	40 000 Q2	45 000	50 000 Q3
Металло-конструкция	Проверить каждые 5000 часов									
Дизельный агрегат	Капитальный ремонт									
	Генератор Муфта									
Механизм поворота	Редуктор									
	Двигатель									
	Шестерня ОПУ Тормоз									
Оси	Ось									
	Тормоза									
Ходовая часть	Гидравлические двигатели Клапаны									
	Насос									
Гидравлическая система	Уплотнения									
	Привод									
Электрическая система	Система управления									
	Редуктор Тормоз									
Механизм подъема	Блоки									
	Двигатель									
	Канаты									
	6 000 час									
Система выносных опор	Цилиндры									
Механизм изменения вылета стрелы	Цилиндры									
Ходовая часть на рельсах										
Ходовая часть на шинах	Ось									
	Двигатель									
	Тормоз									
	Редуктор									
Компоненты	Рабочие часы	5 000	10 000	15 000	20 000	25 000	30 000	40 000	45 000	50 000

По данной таблице определяются рекомендованные сроки службы в моточасах несущих металлоконструкций кранов, а также основных узлов и компонентов крана — механизмов подъема, поворота, ходовой части, электро- и гидрооборудования — при определенном режиме нагружения Q. Например, срок службы металлоконструкции крана составляет 40 000 моточасов при режиме нагружения Q2.

Согласно FEM⁸, в паспортах импортных кранов указан (рекомендован) режим нагружения Q2. Однако при анализе фактической загруженности нескольких обследованных кранов было установлено, что действующий режим нагружения соответствует уровню Q3, что превышает паспортные значения группы классификации (режима) крана [10].

⁸ F.E.M. 1.001–1998. Правила проектирования подъёмных устройств. VBOOK.PUB. URL: <https://vbook.pub/documents/fem-1001-3-edition-revised-1998101-rules-for-the-design-of-hoisting-appliances-5wglvzj78o7> (дата обращения: 24.02.2025).

При проведении экспертизы промышленной безопасности особенно важно собрать данные о реальной загрузке крана [11]. Тем не менее, далеко не всегда есть возможность воспользоваться регистраторами параметров, так как они могут находиться в неработоспособном состоянии. Поэтому в таких ситуациях решено применить статистические данные о фактической загрузке кранов.

Загрузка стреловых кранов является функцией как минимум двух параметров — массы груза и вылета стрелы, произведение которых определяет грузовой момент. В общем случае эти параметры могут быть случайными величинами [12], их следует учитывать при определении загрузки крана.

Таким образом, ключевой задачей определения группы классификации (режима) крана является сбор первичной информации и построение гистограмм распределения перемещаемых масс грузов и вылетов стрелы испытуемого крана. Распределение случайных величин (массы перемещаемых грузов и вылет стрелы крана) характеризуется такими величинами, как среднее значение (математическое ожидание) и среднеквадратичное отклонение (дисперсия).

Принимаем закон распределения случайных величин (массы перемещаемых грузов и вылет стрелы крана) за нормальный, что значительно упростит расчеты в дальнейшем [13]. Принятые допущения подтверждаются исследованиями вылета и угла наклона стрел порталных кранов, представленными в работах [7, 8].

Результаты исследования. С целью получения более объективной информации для принятия обоснованного решения о дальнейшей эксплуатации стреловых кранов зарубежных компаний, разработана методика оценки фактической группы классификации (режима) для проведения экспертизы промышленной безопасности. Процесс включает несколько этапов. Первым шагом является определение фактического значения коэффициента распределения нагрузок K_p через грузовые моменты и его сравнение с паспортным значением. Второй этап включает оценку остаточного ресурса по наработке и его сопоставление с нормативным значением. Затем проводится расчет максимальных напряжений на усталость ресурсопределяющего узла металлоконструкции с последующим сравнением полученного значения с предельным. Также осуществляется расчет вероятности разрушения конструкции и его сравнительный анализ с допустимым значением. Важным элементом оценки является анализ уровня риска аварии.

В качестве примера рассмотрен конкретный объект, на котором определена фактическая группа классификации (режима) стрелового крана, который рекомендован к списанию. На первом этапе определен коэффициент распределения нагрузок K_p определен через грузовые моменты из выражения:

$$K_p = \sum_i \left[\frac{C_i}{C_T} \right] \left(\frac{M_{(xy)}}{M_n} \right)^3, \quad (1)$$

где C_i / C_T — отношение количества циклов работы крана со средним грузовым моментом к общему количеству циклов (в расчетах принимаем равное 1); $M_{(xy)}$ — математическое ожидание грузового момента; M_n — максимальный грузовой момент крана, указанный в паспорте крана; $M_{xy} = 28 \cdot 40 = 1120$ т·м; $M_n = 33,4 \cdot 50 = 1670$ т·м (40 и 50 — среднее и наибольшее значение вылета в крюковом режиме; 28,0 и 33,4 — средняя и наибольшая грузоподъемность крана в крюковом режиме по грузовой характеристике).

$$K_p = 1 \cdot \left(\frac{1120}{1670} \right)^3 \cdot 3 = 0,30. \quad (2)$$

В соответствии с [5, 6, 9], группа классификации (режима) кранов в целом определяется в зависимости от класса использования (U0 – U9), характеризующегося величиной максимального числа циклов за срок службы, и режима нагружения (Q1–Q4). Расчетное значение коэффициента распределения нагрузок $K_p = 0,30$ соответствует группе классификации (режима) крана в целом А6, но выше паспортного значения А5 [14].

На втором этапе произведена оценка остаточного ресурса крана по текущему значению характеристического числа, которое является мерой ресурса крана, и определяется с учетом коэффициента распределения нагрузок крана для соответствующего режима нагружения и количества рабочих циклов [15].

Предельное состояние крана по наработке наступает при условии равенства или превышения текущего характеристического числа относительно нормативного значения. Остаточный ресурс определен из выражения:

$$C_{ост} = (N_n - N_T) \cdot \left(\frac{M_n}{M_{xy}} \right)^3, \quad (3)$$

где N_n — нормативное значение характеристического числа, принимаемое в зависимости от группы классификации крана по режиму работы в соответствии с [9, 10]; N_T — текущее значение характеристического числа.

$$N_T = C \cdot \left(\frac{M_{xy}}{M_n} \right)^3. \quad (4)$$

Для ранее рассмотренного примера дополнительные условия следующие:

$N_n = 125\,000$ — нормативное значение характеристического числа для группы классификации (режима) крана А5;

$C = 596\,228$ — расчетное количество рабочих циклов.

Тогда текущее значение характеристического числа:

$$N_T = 596228 \cdot 0,67^3 = 179\,323;$$

$$179\,323 > 125\,000;$$

$$N_T > N_n.$$

Вывод: ресурс исчерпан.

На следующем этапе произведен проверочный расчет ресурсопределяющего узла металлоконструкции [11] на сопротивление усталости по формуле.

$$\sigma_{max} = \alpha_v \cdot R_v \cdot \gamma_v \cdot \gamma_c, \quad (5)$$

где σ_{max} — наибольшее напряжение; α_v — коэффициент режима работы элемента; R_v — расчетное сопротивление усталости, определяемое с учетом временного сопротивления, стали и группы соединений элементов, учитывающих степень концентрации напряжений; γ_v — коэффициент, учитывающий вид напряженного состояния и асимметрию действующих напряжений; γ_c — коэффициент условий работы.

Значение коэффициента режима работы α_v определен в зависимости от группы режима крана и степени концентрации напряжений. Значение γ_v рассчитываем в зависимости от вида напряженного состояния и коэффициента асимметрии напряжений:

$$\rho = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}, \quad (6)$$

где σ_{min} и σ_{max} — наибольшее и наименьшее по абсолютному значению напряжения в рассчитываемом элементе.

В качестве примера выполнен расчет опорного контура поворотного устройства portalного крана. Результаты расчета на сопротивление усталости представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты расчета на сопротивление усталости

Параметр	Значение
Максимальное сжимающее напряжение, σ_{max}	65 МПа
Максимальное растягивающее напряжение, σ_{min}	55 МПа
Коэффициент режима работы элемента α_v	1,5
Расчетное сопротивление усталости R_v для 6-ой группы элементов по концентрации напряжений	60 МПа
Коэффициент режима работы элемента, α_v	1,5
Коэффициент, учитывающий вид напряженного состояния и асимметрию действующих напряжений, γ_v	1,08
Коэффициент условий работы, γ_c	0,7
Условие прочности на сопротивление усталости	65 МПа не более 68 МПа

Проверочный расчет опорного контура поворотного устройства portalного крана на сопротивление усталости показал, что расчетные максимальные значения напряжений близки к предельному значению.

Имея статистический материал о загруженности стрелового крана, определена вероятность разрушения ресурсопределяющего элемента металлоконструкции из выражения:

$$P_{разр} = \left[\frac{1}{2} - \Phi \left(\frac{\sigma_k - \sigma_{вер}}{\sigma_n} \right) \right] \left[\frac{1}{2} + \Phi \left(\frac{\sigma_k - \sigma_{пер}}{\sigma_n} \right) \right], \quad (7)$$

где $\Phi(x)$ — функция Лапласа; σ_n — среднее квадратичное отклонение напряжений в распределении фактора нагрузки; σ_n — среднее квадратичное отклонение напряжений в распределении фактора прочности; $\sigma_{вер}$ — среднее расчетное напряжение в конструкции; $\sigma_{пер}$ — среднее значение предела выносливости материала конструкции с учетом асимметрии цикла; σ_k — расчетное значение напряжения в точке пересечения распределения переменных напряжений и распределения пределов выносливости, которое можно получить из решения равенства уравнений распределений нагрузки и прочности. Результаты расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты расчета вероятности разрушения ресурсопределяющего элемента металлоконструкции

Параметр	Значение
$\sigma_{\text{вср}}$	58 МПа
$\sigma_{\text{н}}$	2,5 МПа
$X(\text{н})$	1,6
$\Phi(\text{н})$	0,4452
$\sigma_{\text{пср}}$	68 МПа
$\sigma_{\text{п}}$	3,3 МПа
$\sigma_{\text{к}}$	62 МПа
$X(\text{п})$	1,81
$\Phi(\text{п})$	0,4649
Расчетное значение вероятности разрушения $P = (0,5 - 0,4452) \cdot (0,5 - 0,4649) = 0,0548 \cdot 0,0351$	$2 \cdot 10^{-3}$
Допустимое значение вероятности	$1,0 - 0,9999 = 0,0001 (10^{-4})$

Условие безопасности не выполняется, т.к. расчетное значение вероятности разрушения равно $2 \cdot 10^{-3}$ превышает допустимое, равное 10^{-4} .

Для сравнения в таблице 7 приведены вероятности отказа элементов кранов стрелового типа.

Таблица 7

Вероятности отказа элементов кранов стрелового типа

Наименование	Событие	Вероятность
Тормоз	Отказ	$3,5 \cdot 10^{-5} - 3,3 \cdot 10^{-7}$
Канат	Обрыв проволок	$3,6 \cdot 10^{-4}$
	Износ	$3,8 \cdot 10^{-5}$
Блоки	Отказ	$2,7 \cdot 10^{-3} - 5,6 \cdot 10^{-4}$
Двигатель	Отказ	$1,28 \cdot 10^{-4} - 6,2 \cdot 10^{-7}$
Металлоконструкция	Повреждение	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Пускорегулирующая аппаратура	Отказ	$9,5 \cdot 10^{-4}$
Ходовые колеса	Износ	$9,9 \cdot 10^{-6}$
Электропроводка	Отказ	$1,9 \cdot 10^{-4}$
Редуктор	Отказ	$8,7 \cdot 10^{-6}$

На заключительном этапе, основываясь на нормативно-технической документации, выполнена оценка уровня риска дальнейшей безопасной эксплуатации стрелового крана. Произведен расчет фоновое значения риска аварий на грузоподъемные краны по статистическим данным за последние 27 лет:

- среднее количество кранов за период наблюдения — 254 250 ед.;
- среднее число аварий — 42,29;
- фоновая вероятность аварии — $42,29/254\,250 = 0,000166 = 1,66 \cdot 10^{-4}$

Ущерб от аварий на опасных производственных объектах, где эксплуатируются грузоподъемные краны, включая прямые потери, затраты на локализацию и ликвидацию последствий аварий, экономический ущерб по статистическим данным из источников в открытой печати представлены в таблице 8.

Таблица 8

Экономический ущерб от аварий

Год	Экономический ущерб, руб.	Год	Экономический ущерб, руб.
2003	16 000 000	2014	50 000 000
2004	8 000 000	2015	78 000 000
2005	60 000 000	2021	150 000 000
2008	165 000 000	2022	73 778 191
2009	62 000 000	2023	70 648 042

В таблице 9 для сравнения приведены сведения о вероятности событий других типов оборудования, эксплуатируемого на опасных производственных объектах.

Таблица 9

Вероятности событий различных типов оборудования

Тип оборудования	Событие	Вероятность
Сосуды под давлением	Разгерметизация	$4,0 \cdot 10^{-5} - 6,2 \cdot 10^{-6}$
	Полное разрушение	$3,0 \cdot 10^{-7}$
Резервуары для горючих жидкостей	Полное разрушение	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Резервуары со стационарной крышей	Пожар	$9,0 \cdot 10^{-5}$
Технологический трубопровод	Разрыв	$1,4 \cdot 10^{-6} - 6,4 \cdot 10^{-9}$
Цех металлургический	Пожар	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Автомобильный транспорт (США)	Авария	$3 \cdot 10^{-4}$
Автомобильный транспорт (РФ)	Авария	$2,7 \cdot 10^{-4}$
Водный, воздушный транспорт (США)	Авария	$9 \cdot 10^{-6}$
Водный транспорт (РФ)	Авария	$2,2 \cdot 10^{-7}$
Воздушный транспорт (РФ)	Авария	$3,4 \cdot 10^{-7}$
Транспорт ж/д (США)	Авария	$4 \cdot 10^{-6}$
Транспорт ж/д (РФ)	Авария	$2 \cdot 10^{-8}$

Обсуждение и заключение. Полученные результаты на конкретном примере показали, что превышение группы классификации (режима) крана над паспортным значением и превышение назначенного ресурса крана в целом, включая ресурсопределяющие конструктивные элементы, неизбежно приведет к возрастанию риска возникновения аварий с использованием стреловых кранов. Таким образом, установлено, что фактическая группа классификации (режима) крана определена как А6, что превышает паспортное значение А5.

Разработанная методика оценки фактической группы классификации (режима) стреловых кранов зарубежных компаний позволит значительно снизить вероятность разрушения конструкций стреловых кранов и уровень аварий в процессе экспертизы промышленной безопасности. В настоящее время уровень приемлемого риска в России принят на качественном уровне без конкретных численных значений вероятности аварий и величины ущерба. Численные значения вероятности аварий и размеры ущерба определяются на основе экономического и социального развития общества и могут варьироваться для отдельных отраслей промышленности. В связи с этим рекомендуется при расчетах использовать фоновую вероятность аварии грузоподъемного крана $1,66 \cdot 10^{-4}$, а среднее значение материального ущерба 73,2 млн. руб.

Список литературы / References

1. Tong Yang, Ning Sun, He Chen, Yongchun Fang. Motion Trajectory-Based Transportation Control for 3-D Boom Cranes: Analysis, Design, and Experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;66(5):3636–3646. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2853604>
2. Xing Pan, Zekun Wu Performance Shaping Factors in the Human Error Probability Modification of Human Reliability Analysis. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2020;26(3):538–550. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1498655>
3. Xing Pan, Ye Lin, Congjiao He. A Review of Cognitive Models in Human Reliability Analysis. *Quality and Reliability Engineering International*. 2017;33(7):1299–1316. <https://doi.org/10.1002/qre.2111>
4. Che Haiyang, Zeng Shengkui, Guo Jianbin. Reliability Assessment of Man-Machine Systems Subject to Mutually Dependent Machine Degradation and Human Errors. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019;190(3):106504. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106504>
5. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Короткий А.А. Влияние компетенций специалистов грузоподъемных кранов на вероятность возникновения аварийных ситуаций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;(2):70–79. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79>
- Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Korotkiy AA. Influence of the Competencies of Lifting Crane Specialists on the Probability of Emergencies. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;(2):70–79. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79>

6. Егельская Е.В., Романенко М.Ю. Аспекты применения риск-ориентированного подхода на опасных производственных объектах. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2020;(4):45–49. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-45-49>

Egelskaya EV, Romanenko MYu. Aspects of Application of a Risk-Based Approach to Hazardous Production Facilities. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;(4):45–49. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-45-49>

7. Панфилов А.В., Дерюшев В.В., Короткий А.А. Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода. *Безопасность труда в промышленности*. 2020;(5):48–55. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-48-55>

Panfilov AV, Deryushev VV, Korotkiy AA. Recommended Safety Systems for Risk-Oriented Approach. *Occupational Safety in Industry*. 2020;(5):48–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-48-55>

8. Pullin R, Holford KM, Lark RJ, Eaton MJ. Acoustic Emission Monitoring of Bridge Structures in the Field and Laboratory. *Journal of Acoustic Emission*. 2008;26:172–181. URL: <https://www.ndt.net/article/ewgae2008/papers/136.pdf> (accessed: 15.05.2024).

9. Anastasopoulos AA, Kourousis DA, Cole PT. Acoustic Emission Inspection of Spherical Metallic Pressure Vessels. In: *The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT*. Tehran, Iran: 2008. URL: <http://www.ndt.net/article/tindt2008/papers/177.pdf> (accessed: 15.05.2024).

10. Gongtian Shen, Zhanwen Wu. Investigation on Acoustic Emission Source of Bridge Crane. *Insight - NonDestructive Testing and Condition Monitoring*. 2010;52(3):144–148. <https://doi.org/10.1784/insi.2010.52.3.144>

11. Aljets D, Chong A, Wilcox S, Holford K. Acoustic Emission Source Location in Plate-Like Structures Using a Closely Arranged Triangular Sensor Array. In: *Proceedings of the 29th European Conference on Acoustic Emission Testing EWGAE*. Vienna, Austria; 2010. P. 85–98.

12. Rong Chen, Xiao Yang Li, Lin Lin Zhang, Xiang Yu Wang. Numerical Simulation of Spherical Indentation Method to Identify Metal Material Properties. *Advanced Materials Research*. 2015;(1119):779–782. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1119.779>

13. Syngellakis S, Habbab H, Mellor BG. Finite Element Simulation of Spherical Indentation Experiments. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2018;6(4):749–763. <http://doi.org/10.2495/CMEM-V6-N4-749-763>

14. Андрианов Е.Н., Иванов А.Н. Актуальные вопросы конструирования и расчета механизмов изменения вылета стрелы порталных кранов. *Журнал университета водных коммуникаций*. 2012;(2):81–92.

Andrianov EN, Ivanov AN. Topical Problems of Construction and Design of the Gantry Crane Boom Outreach Control Mechanisms. *Zhurnal Universiteta Vodnykh Kommunikatsii*. 2012;(2):81–92. (In Russ.)

15. Khvan R. Use of Artificial Neural Networks for Solving the Problem of Residual Resource Estimation of Hoisting Cranes. *E3S Web of Conferences*. 2024;515:04015 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451504015>

Об авторах:

Дмитрий Николаевич Симонов, главный конструктор ООО ИКЦ «Мысль» НГТУ (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Троицкая, 88)

Роман Владимирович Хван, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), khvanroman@yandex.ru

Эльвира Анатольевна Панфилова, кандидат философских наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), korotkaya_elvira@mail.ru

Леонид Александрович Терновской, аспирант кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#)

Заявленный вклад авторов:

Д.Н. Симонов: разработка концепции, научное руководство, разработка методологии.

Р.В. Хван: административное руководство исследовательским проектом, проведение исследования, написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Э.А. Панфилова: визуализация, формальный анализ, валидация результатов.

Л.А. Терновской: курирование данных, написание черновика рукописи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Dmitry N. Simonov, Chief Designer, “Mysl” Engineering and Consulting Center OOO NGTU (88, Troitskaya St., Novocherkassk, 346428, Russian Federation)

Roman V. Khvan, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), khvanroman@yandex.ru

Elvira A. Panfilova, Cand. Sci. (Philosophy), Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), korotkaya_elvira@mail.ru

Leonid A. Ternovskoi, Postgraduate Student of the Department of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#)

Claimed Contributorship:

DN Simonov: concept development, academic advising, methodology development.

RV Khvan: administrative management of a research project, conducting research, writing a manuscript – reviewing and editing.

EA Panfilova: visualization, formal analysis, validation of the results.

LA Ternovskoi: data curation, writing a draft manuscript.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.03.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 07.04.2025

Принята к публикации / Accepted 16.04.2025