

УДК 62-19

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УЩЕРБА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**Москвина Е.А., Извеков Ю.А., Гугина Е.М., Шеметова В.В.***ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, e-mail: yurij.izvekov@mail.ru*

Рассмотрен модельный анализ характеристик ущерба сложных технических систем металлургического предприятия. В качестве таких систем исследуются несущие конструкции грузоподъемных мостовых кранов различного назначения. В процессе эксплуатации эти конструкции работают в тяжелых и сверхтяжелых режимах, что приводит к их быстрому изнашиванию. Требуется доработки и ремонты конструкции либо на месте, либо с остановкой производственного цикла. Выделены три типа аварий, которые могут возникать при эксплуатации таких систем. Это аварии, которые не требуют серьезных ремонтов и остановок, требующие и катастрофические аварии. Рассчитаны характеристики ущерба – математическое ожидание суммарного ущерба и нижняя граница его среднего квадратического отклонения. В качестве исходных данных приняты обобщенные данные по авариям на грузоподъемном оборудовании металлургической отрасли, а ущерб посчитан в условных относительных единицах. Получены численные значения ущерба, количества аварий от различных типов аварий. Предложенный подход позволит получить оптимальные значения вероятности аварий и ущербов от них. Представленный модельный анализ поможет задать оптимальные требования к характеристикам рисков и безопасности рассматриваемых и подобных сложных технических систем.

Ключевые слова: ущерб, авария, сложная техническая система, вероятность аварии, оптимальные значения

MODEL ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF DAMAGE OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS OF THE METALLURGICAL ENTERPRISE METALLURGICAL ENTERPRISE**Moskvina E.A., Izvekov Yu.A., Gugina E.M., Shemetova V.V.***Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, e-mail: yurij.izvekov@mail.ru*

The model analysis of characteristics of damage of complex technical systems of the metallurgical enterprise is considered. As such systems bearing structures of load-lifting bridge cranes of different function are investigated. In the course of an exploitation these designs work in the heavy and superheavy modes that leads to their fast wear. Completions and repairs of a design either on the place, or with a stop of a production cycle are required. Three types of accidents which can arise at operation of such systems are allocated. These are accidents which do not demand serious repairs and stops, the demanding and catastrophic accidents. Characteristics of damage – population mean of total damage and the lower bound of its average quadratic deviation are calculated. As basic data obshchenny data on accidents on the lifting equipment of the metallurgical industry are accepted, and the damage is counted in conventional relative units. Numerical values of damage, the number of accidents are received from various types of accidents. The offered approach will allow to receive optimum values of probability of accidents and damages from them. The submitted model analysis will help to set optimum requirements to characteristics of risks and safety of the considered and similar complex technical systems.

Keywords: damage, accident, complex technical system, accident risk, optimum values

В сложных технических системах в процессе эксплуатации возникают различные неисправности, в том числе связанные с выработкой ресурса и превышением допустимых нагрузок. На металлургическом предприятии большое количество устройств и механизмов, которые включают в себя множество элементов. Такие системы будем называть сложными техническими системами. К ним относятся металлургические мостовые краны, несущие металлоконструкции которых испытывают тяжелые и весьма тяжелые режимы работы, быстро изнашиваются и переходят в аварийное состояние [1, 2].

Такая эксплуатация приводит к авариям и катастрофам. На сегодняшний день известны и совершенствуются методики

расчета ущерба от эксплуатации различных технических систем [3, 4]. Актуальной является задача расчета ущерба от эксплуатации определенной группы технических систем на временном интервале, а также задания таких характеристик к ним, при которых средний ущерб от аварий стремился бы к минимуму.

Цель исследования: определить методику расчета возможного ущерба с целью ее использования для управления риском и безопасностью изучаемых технических систем.

Целью данной статьи является количественный модельный анализ характеристик ущерба совокупности несущих конструкций металлургических мостовых кранов, используя известные методики [3, 4].

Материалы и методы исследования

На металлургическом предприятии эксплуатируются около 1200 кранов различного назначения (по данным ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»). Характеристики их безаварийной эксплуатации и надежности изменяются как случайным так и закономерным образом.

Более половины кранов составляют металлургические мостовые краны, примем их количество 750. Предполагаем, что 750 кранов эксплуатировалась без превышения допустимых нагрузок в течение пятнадцати лет – гарантийный срок эксплуатации [3, 4].

К сожалению, на практике это почти невозможно, потому что, как правило, рассматриваемые краны работают в тяжелых и сверхтяжелых режимах. Конечно, при этом присутствуют аварии того или иного типа.

Тогда случайное событие возникновения аварии j -го типа A_j представляется дискретной величиной, принимающей значения 0 или 1 и характеризуемой вероятностью аварии $P(A_j) = P_j$ [3, 4]. Ущерб U от нее представляется случайной непрерывной величиной $G_j (G_j = U_j)$, полагая, что любой ущерб можно выразить в одинаковых единицах (условных относительных единицах).

Случайная величина безусловного ущерба C_j от аварии j -го типа, учитывающая факт отсутствия или возникновения аварии или величину ущерба, представляется в следующем виде:

$$C_j = A_j R_j, \quad (1)$$

R_j – характеристика риска.

Если произошла остановка работы конструкции крана, то ущерб может быть различным, но его величина характерна для данного типа аварии и не связана с вероятностью аварии. Риск будем рассматривать как математическое ожидание безусловного ущерба от аварии j -го типа.

Учитывая независимость случайных величин A и R , запишем выражение для дисперсии случайной величины C [3, 4]:

$$\sigma^2 [C_j] = P_j^2 \sigma^2 [R_j] + M^2 [R_j] \sigma^2 [A_j] + \sigma^2 [A_j] \sigma^2 [R_j]. \quad (2)$$

Величины C случайны, зависимы и имеют положительную корреляцию. Возникновение аварии одного типа может перерасти в возникновение более тяжелой аварии.

$$M(C) = \sum_{j=1}^k M[C_j] = \sum_{j=1}^k P_j M[R_j] = \sum_{j=1}^k P_j M[U_j]. \quad (3)$$

Если ковариационная матрица бывает известна, то среднее квадратическое отклонение суммарного ущерба определяется зависимостью

$$\sigma[C] = \sqrt{\sum_{i=1}^k \sigma^2 [C_j] + 2 \sum_{j < i} K_{ji}}. \quad (4)$$

Если же ковариационная матрица неизвестна, то, учитывая их положительное значение, можно найти границу величины дисперсии $\sigma^2 [C]$:

$$\sigma^2 [C] \geq \sum_{i=1}^k \sigma^2 [C_j]. \quad (5)$$

Когда введены исходные данные, то есть определена группа сложных технических систем, работающих в одно и то же время, в одинаковых условиях, можно предположить, что их эксплуатация и режимы работы могут привести к трем типам аварий.

Будем различать следующие типы аварий:

- первый – аварии, не приводящие к остановке крана, или аварии, которые могут быть устранены без существенных изменений производственного цикла;
- второй – аварии, приводящие к остановке крана, производственного цикла и его ремонту;
- третий – катастрофические аварии, повлекшие за собой разрушение конструкции и гибель людей, остановку производственного процесса.

Очевидно, такая классификация достаточно условна, так как каждый тип аварии может появиться в любое время эксплуатации. Однако предполагаем, что первый тип аварии будет присущ первым годам эксплуатации крана, а второй и третий – годам выработки ресурса.

Будем также предполагать, что известны вероятности таких типов аварий, средние квадратические отклонения $\sigma[A_j]$, математические ожидания $M[R_j]$ и средние квадратические отклонения $\sigma[R_j]$ случайного ущерба за год. Необходимо найти математическое ожидание суммарного ущерба за следующий год эксплуатации совокупности металлургических мостовых кранов и нижнюю границу дисперсии случайного суммарного ущерба.

Результаты исследования и их обсуждение

Приведем модельный пример расчета суммарного ущерба. Используя обработанные и известные данные по статистическим данным аварийности металлургических производств [4–6], представим в условных единицах исходные данные в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные по относительным единицам ущербов

j	1	2	3
p	0,1	0,01	0,0001
$\sigma[A_j]$	0,01	0,001	0,00001
$M[R_j]$, усл.ед.	10	100	1000
$\sigma[R_j]$, усл. ед.	1	10	100

$$M[C_1] = 0,1 * 10 = 1 \text{ усл. единица};$$

$$M[C_2] = 0,01 * 100 = 1 \text{ усл. единица};$$

$$M[C_3] = 0,0001 * 1000 = 0,1 \text{ усл. единица}.$$

$$M[C] = \sum_{j=1}^3 M[C_j] = 2,1 \text{ усл. единица}.$$

По (2) получим

$$\sigma[C_1] = \sqrt{(0,1*1)^2 + (10*0,01)^2 + (0,01*1)^2} \approx 0,142 \text{ усл. единиц;}$$

$$\sigma[C_2] = \sqrt{(0,01*10)^2 + (100*0,001)^2 + (0,001*10)^2} \approx 0,142 \text{ усл. единиц;}$$

$$\sigma[C_3] = \sqrt{(0,0001*100)^2 + (1000*0,00001)^2 + (0,00001*100)^2} \approx 0,014 \text{ усл. единиц.}$$

На основании (5) получена нижняя граница среднего квадратичного отклонения суммарного ущерба

$$\sigma[C] \geq 0,201 \text{ усл. единиц.}$$

Интерпретировать полученные расчетные данные можно следующим образом. При анализе 750 рассматриваемых несущих конструкций металлургических мостовых кранов с подобными полученными характеристиками, становится очевидно что за пятнадцать лет их эксплуатации в таких же режимах без изменения показателей суммарный средний ущерб от возможных аварий составит $750 * 15 * 2,1 = 23625$ усл. единиц.

Таким образом, для группы металлургических мостовых кранов могут быть рассчитаны математические ожидания

ущерба для всех рассматриваемых типов аварий.

Так, рассчитанный суммарный средний ущерб аварий первого типа $M[R_j] = 10$ будет соответствовать 2363 авариям, суммарный средний ущерб аварий второго типа $M[R_j] = 100$ будет соответствовать 236 авариям, суммарный средний ущерб аварий третьего типа $M[R_j] = 1000$ будет соответствовать 24 авариям за пятнадцать лет эксплуатации (рис. 1).

Полученные расчетные данные удовлетворительно согласуются с реальными [6].

Одной из прямых характеристик ущерба является коэффициент смертельного травматизма на 1000 единиц техники. В табл. 2 и на рис. 2 приведены данные Ростехнадзора [6] за 2016 г.

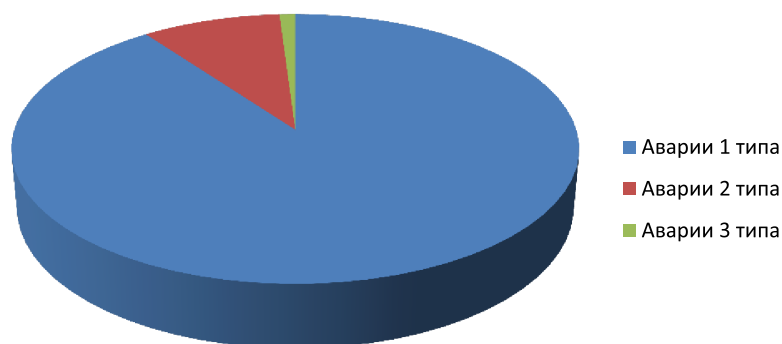


Рис. 1. Количество аварий конструкций кранов

Таблица 2

Коэффициенты опасности за 2016 г.

Вид техники	Количество зарегистрированной техники	Количество погибших	Коэффициент смертельного травматизма
Башенные краны	17 403	10	0,57
Автомобильные краны	61 875	6	0,10
Мостовые краны	71 648	7	0,10
Козловые краны	13 254	3	0,23
Гусеничные краны	9 294	0	0
Краны-манипуляторы	12 413	1	0,08
Портальные краны	3 023	0	0

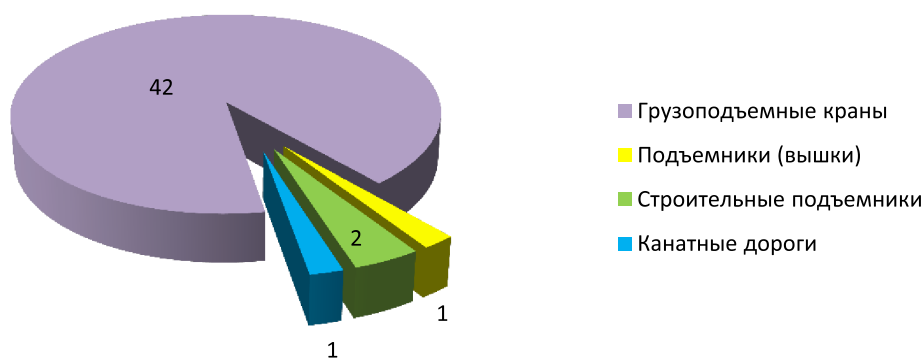


Рис. 2. Распределение аварий по видам техники (2016 г.)

Большее количество аварий и травматизма связано с эксплуатацией различных кранов, в том числе мостовых. Это обстоятельство лишний раз подчеркивает актуальность и правильность такого подхода, даже модельного.

Модельный расчет показывает, как важно рассчитать и учитывать риск аварий и ущерб от него таких потенциально опасных объектов, как несущие конструкции металлургических мостовых кранов. Такой подход позволяет связывать дальнейшую эксплуатацию рассматриваемых конструкций с оценкой их фактического состояния, с одной стороны, и уровнем безопасности, с другой, что важно при принятии различных управленческих решений.

Можно уменьшить вероятности аварий, если затратить на это дополнительные ресурсы или увеличить вероятность, сэкономив на стоимости производства и эксплуатации. Аналогично, затратив дополнительные ресурсы, можно уменьшить ущерб или, упростив конструкцию, можно увеличить средний ущерб от возможных аварий [3, 4].

Такая задача решается методом линейного программирования [7]. В самом простом случае его суть можно описать следующим: если уменьшение ущерба и вероятности аварии обойдется дешево, то можно максимально уменьшить эти характеристики и, наоборот, оптимальные значения требуют их увеличения.

Выводы

На предприятия металлургии в течение длительного времени поставляются грузоподъемные мостовые краны различного назначения. Они эксплуатируются в тяжелых

и сверхтяжелых режимах работы. Это приводит к остановкам кранов, их незапланированным ремонтам, а в некоторых случаях, к серьезным авариям и гибели людей.

Оценка характеристик ущерба несущих конструкций металлургических мостовых кранов и других сложных технических систем представляет собой актуальную задачу.

Модельный расчет был основан на известных методиках, применяемых для расчета ущерба различных технических систем, обработанных данных Ростехнадзора и известных данных.

Величина ущерба от таких аварий случайна, но зависит не от факта, а от типа аварии. Возникновение аварии одного типа может породить более сложную и тяжелую.

Математическое ожидание суммарного ущерба и нижняя граница его среднего квадратического отклонения позволяют рассчитать суммарный ущерб от аварий различных типов. Такая методика позволяет в дальнейшем выявить оптимальное значение вероятности для каждого типа аварии и математическое ожидание ущерба от нее.

Приведенные расчеты позволяют задавать оптимальные требования к характеристикам рисков и безопасности как рассматриваемых технических систем, так и других типов сложных технических систем металлургического предприятия.

Приведенный модельный анализ доказывает правильность предпринятых ранее попыток расчета ущерба сложных технических систем и дополняет их. Кроме этого, расчетные материалы развивают теорию конструкционного риск-анализа и позволяют в дальнейшем принимать верные инженерные управленческие решения.

Список литературы

1. Шашко Б.А. О мостовых кранах для предприятий цветной металлургии // Промышленный транспорт. М., 1987. № 10. 64 с.
2. Извеков Ю.А. Моделирование прогнозирования риска несущих конструкций кранов металлургического производства // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2012. Т. 1. № 70. С. 6–8.
3. Волков Л.И. Методика расчета и оптимизации ущерба от аварий технических систем // Двойные технологии. 2001. № 1. С. 1–6.
4. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты // Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов. М.: МГФ «Знание», 2015. 600 с.
5. Извеков Ю.А. Совершенствование методологии повышения качества кранового оборудования металлургических предприятий на основе теории риск-анализа // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКом 2018): научные труды 4-й Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. 2018. С. 124–125.
6. Хроника аварий // Ростехнадзор [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gosnadzor.ru> (дата обращения: 26.03.2019).
7. Кремер Н.Ш., Путко Б.А., Тришин И.М., Фридман М.Н. Исследование операций в экономике: 3-е изд., пер. и доп.: учеб. пособие для вузов / Под ред. проф. Н.Ш. Кремера. М.: Юрайт, 2014. 438 с.