

**В.И. Кычкин, Л.А. Рыбинская**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Россия

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РИСКОВ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ КРАНОМАНИПУЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

*Для металлоконструкции стрелы краноманипуляторной установки разработан метод оценки расчетного остаточного ресурса на основе условного риска. Рассмотрены этапы определения напряженно-состояния зоны возникновения трещины. Приведена методика расчета остаточного ресурса в вероятностной постановке и определения условного риска производителя машины и потребителя техники.*

**Ключевые слова:** *расчетный ресурс, напряженное состояние, расчетная зона и начальный размер трещины, плотность вероятности, доверительный интервал, условный риск.*

Благодаря высокой мобильности и универсальности краноманипуляторных установок (КМУ) бортовых автомобилей эта техника стала востребованной при строительстве, транспортировке грузов, в дорожной логистике и занимает в экономике рыночных отношений высокое место [1]. В связи с этим интенсификация производства КМУ различными фирмами-производителями и сервисными центрами порождает проблемы поддержания оборудования в технически исправном состоянии, что обусловлено экономическими и социальными факторами.

Надежность машины, ее производительность, возможность использовать запасные части при обслуживании, ремонте и цена играют важную роль в процессе приобретения модели КМУ. Покупка гидроманипулятора связана с риском: потребитель может стать «испытательным полигоном» для модели машины, а в итоге она может оказаться некачественной техникой [1].

Введение в эксплуатацию КМУ требует сертификации и получения разрешения на их производство в органах Ростехнадзора. Взаимодействие Ростехнадзора, органов по сертификации технических устройств и автотранспортных средств (АТС) обеспечивает реализацию приемлемого риска эксплуатации КМУ [2].

Количественное определение степени риска может быть достаточно объективно осуществлено только с помощью глубокого статистического анализа [3]. В свою очередь, эксплуатация машин с КМУ как узкоспециализированной техники не достигла еще в настоящее время такой емкости, которая бы позволила уверенно применять статистический материал для оценки риска. Кроме того, необходимо учитывать требование к КМУ, входящих в определенный состав конструктивного исполнения, ориентировки на одинаковую степень риска. На практике же срок эксплуатации объекта различный, он зависит от срока осуществленной эксплуатации, расходов на ремонт и восстановление, значимости объекта, условий его функционирования и т.п. Поэтому прогнозирование ресурса машины и оценка риска становятся индивидуальными для отдельной конструкции и ее расчетной зоны, что существенно усложняет задачу и увеличивает неопределенность принятия решений.

Для каждого элемента машины необходимо определять категорию, отражающую его состояние с точки зрения возможных последствий при реализации ситуаций нагружения. В общем виде суммарный риск можно определить в форме

$$R = \sum_{i=1}^n R_i ,$$

где  $n$  – число расчетных зон;  $R_i$  – риск реализации  $j$ -го опасного состояния  $i$ -й расчетной зоны металлоконструкции,  $R_i = \sum_{j=1}^{M_i} r_{ij}$  ;  $j = \overline{1, M_i}$  ;  $M_i$  – число опасных состояний.

Для конкретного оборудования требуется конкретная методика оценки ресурса и оценки риска с учетом специфических особенностей и требований, существующих в данном секторе применения КМУ. Формально решение задачи оценки остаточного ресурса КМУ и риска сводится к идентификации ресурсов конструкции с учетом анализа угроз, действующих на эти ресурсы.

Расчетный ресурс КМУ и возникающие при этом риски оценим по двум составляющим: формирующие факторы (проектирование) и факторы, связанные с возможными условиями эксплуатации конструкции (потребитель).

На первом этапе определим параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) расчетной зоны металлоконструкции.

В качестве предельного состояния принимаем условие невозникновения лавинообразного развития трещины. При этом относительный размер трещины определим из условия однократного нагружения из множества нагружений за срок эксплуатации, отличающийся наиболее неблагоприятным сочетанием нагрузок или условий нагружения, что возникает при низкой температуре эксплуатации конструкции. Это условие требует проведения расчета максимального номинального напряжения в рассчитываемом элементе без учета трещины [5].

Для КМУ наиболее вероятными местами появления трещины в металлических конструкциях телескопических коробчатых стрел являются зоны крепления стрелы к платформе и зоны крепления проушины стрелы и кронштейна гидроцилиндра подъема стрелы к гидроманипулятору подъема стрелы (рис. 1).

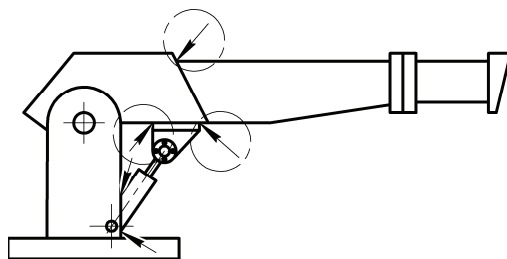


Рис. 1. Характерные повреждения металлоконструкции стрелы КМУ (показано стрелками)

Для определения параметров НДС реализуем модуль конечно-элементного расчета (МКЭ) COSMOSWorks, интегрированный в CAD систему пространственного моделирования SolidWorks. При этом учитываем применение простого интерфейса, малую трудоемкость алгоритма с высокой наглядностью полученных результатов. Для достижения надежного цифрового моделирования и точности результатов корректных процедур численного метода проводим тестовые расчеты на примере изгибаемой балки в условиях чистого изгиба. Результаты расчетов для балки размерами (мм) 362x30x6 сопоставим с экспериментальными данными, полученными с помощью установки, приведенной на рис. 2.

Прогиб балки определяем с помощью индикатора часового типа ИЧ (ГОСТ 577–68), цена деления 0,01 мм. Этот этап работы был обусловлен тем, что при условии безусловного приоритета эксперимента

было необходимо получить информацию о НДС при значительной неопределенности, связанной с отсутствием данных (или их недостаточностью) для расчетной оценки состояния конструкции, в частности, моделирования опоры и схемы приложения нагрузки. Приняты конечные элементы – тетраэдры с гранями, аппроксимируемые параболическими функциями координат. Как видно на рис. 3, напряжения изгиба в зоне балки между опорами остаются постоянными.

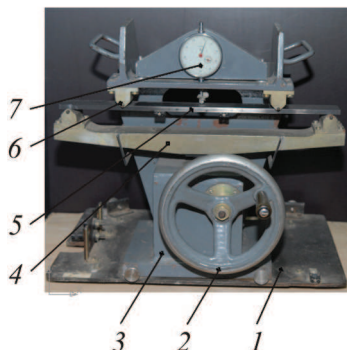


Рис. 2. Экспериментальная установка:

1 – основание; 2 – нагрузочное устройство; 3 – корпус; 4 – траверса; 5 – тарировочная балка; 6 – опоры; 7 – индикатор часового типа

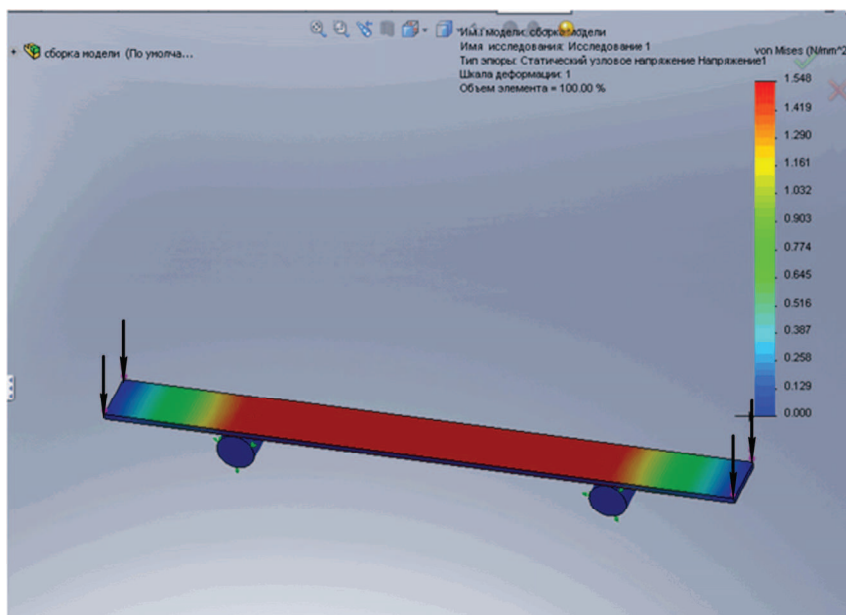


Рис. 3. Результаты расчета по МКЭ тестовой задачи

Результаты расчета для тестовой задачи по классической инженерной методике по методу Мора и по МКЭ приведены в табл. 1. При этом в качестве критериальной, эквивалентной величины для оценки НДС балки использовались эквивалентные напряжения по Мизесу  $\sigma_{\text{vonMises}}$ .

Таблица 1

### Результаты тестовых расчетов

Номер нагрузки	Теория		МКЭ	
	Напряжения, Н/мм <sup>2</sup>	Прогиб, мм	Напряжения, Н/мм <sup>2</sup>	Прогиб, мм
1	1,55	0,0246	1,548	0,0245
2	3,1	0,0493	3,097	0,0493
3	4,65	0,0740	4,647	0,0738
4	6,2	0,0987	6,197	0,0985

Размер сетки КЭ был установлен тестовой задачей и в дальнейшем принят в численном решении анализа НДС расчетной зоны КМУ. При проведении расчетов к выбранным сечениям коробчатой конструкции прикладывали силы и моменты, имитирующие внешние нагрузки на крюке крана и опорные реакции в зоне крепления конструкции и действия гидроманипулятора подъема-опускания стрелы.

Назначение граничных условий в такой форме было также обосновано результатами тестовой задачи. С применением программного комплекса, реализующего МКЭ, была получена модель расчетной зоны (рис. 4).

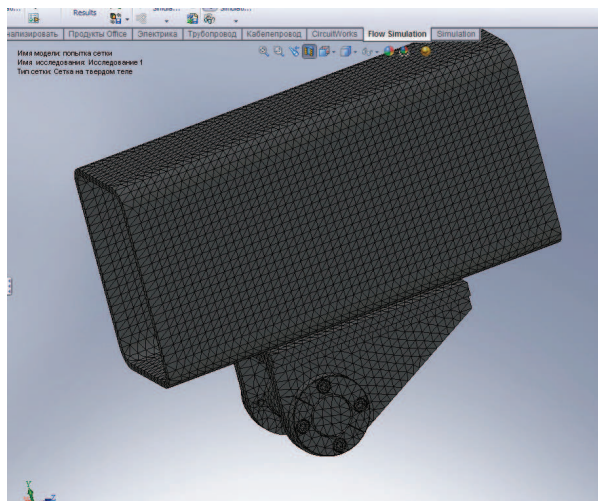


Рис. 4. Сеточная модель

На рис. 5 приведены результаты расчета напряжений в принятой зоне нагружения стрелы.

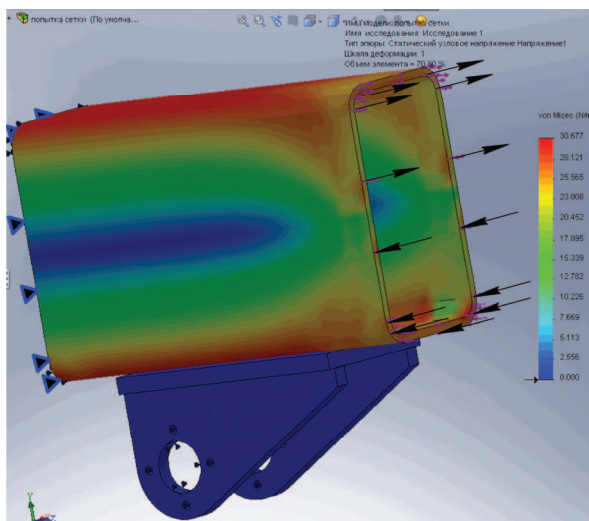


Рис. 5. Поля напряжений

Логично считать, что для вновь создаваемых моделей КМУ нет достаточного количества опытов, на основании которых имеет смысл ориентироваться на статистические свойства вероятности. Кроме того, вероятностно-статистические методы при ограниченном объеме статистического материала или даже его отсутствия не позволяют произвести анализ влияния того или иного фактора на процесс развития трещины до уровня критического. Поэтому считаем, что более эффективным является решение в детерминированной постановке, но с развитием метрологических подходов.

Расчет долговечности (ресурса) определяли по соотношению [4]

$$Z_a = \frac{\gamma_{dN} (\gamma_n \gamma_m^* \Delta K_*)^q}{(0,5q-1) \xi_{ea} V_* (\xi_K \Delta \sigma_1 \sqrt{\pi})^q} \left[ \frac{1}{a_0^{0,5q-1}} - \frac{1}{a_c^{0,5q-1}} \right], \quad (1)$$

где  $\Delta K_* = (0,05\sigma_b - 9)$ ,  $\sigma_b$  в МПа;  $\xi_{ea}$  – коэффициент циклического нагружения,  $\xi_{ea} = \sum_i \left\{ \mu_j \sum_i \left( \frac{\Delta \sigma_{ji}}{\Delta \sigma_1} \right)^q \right\}$ , где  $i, j$  – индексы параметров режимов нагружения;  $V_* = 10^{-7}$  м/цикл;  $\xi_K$  – коэффициент  $K$ -тарировки;

$\Delta\sigma_1 = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$  – размах напряжений в первой ступени нагружения;  $a_0$  – наибольший размер трещины;  $a_c$  – критический размер трещины (отсюда начинается лавинообразное разрушение), который определяется по соотношению  $\alpha_{c2} = \frac{0,65}{\pi} \left( \frac{\gamma_n \gamma_{dc} K_c}{\sigma_{nc} \sqrt{B}} \right)^2$ , где  $K_c$  – критическое значение КИН,  $B$  – ширина балки,  $\sigma_{nc}$  – напряжение по нагрузкам с учетом коэффициента нагрузки.

Наименование параметров в (1) и принятые их числовые значения (аналогичные для кранов) приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Коэффициенты расчетного соотношения ресурса [4]**

Наименование	Обозначение	Уровень значения	
		min	max
Коэффициент надежности по назначению конструкции	$\gamma_n$	0,85	0,95
Коэффициент надежности методики расчета	$\gamma_{dN}$	0,6	0,95
Коэффициент, определяющий нижнюю границу зоны разброса параметров, определяющих КИН	$\gamma_{m*}$	0,95	1
Коэффициент, соответствующий показателю угла наклона усталостной кривой для сварных швов	$q$	3,0	3,5
Коэффициент циклического нагружения	$\xi_e$	1,5	4
Коэффициент надежности методики расчета нормальных напряжений (коэффициент нагрузки)	$\gamma_{dc}$	0,75	0,9

Расчеты проводим для параметров, соответствующих параметрам КМУ типа РС-1500 серии Comract (Австрия).

Расчетные значения остаточного ресурса по (1) приведены на рис. 6, где по оси ординат даны отношения текущего ресурса к его максимальному значению, а по оси абсцисс – этапы нагружения расчетной зоны.

На втором этапе представляем распределение случайной величины остаточного ресурса для различных уровней нагружения. Принимаем гипотезу нормального распределения.

Нормальный закон лучше отражает распределение, чем закон распределения Вейбулла, так как главная особенность распределения заключается в том, что оно является предельным законом, к которому

приближаются другие законы распределения при весьма часто встречающихся типичных условиях, к которым относится и случай развития трещины в металлоконструкциях.

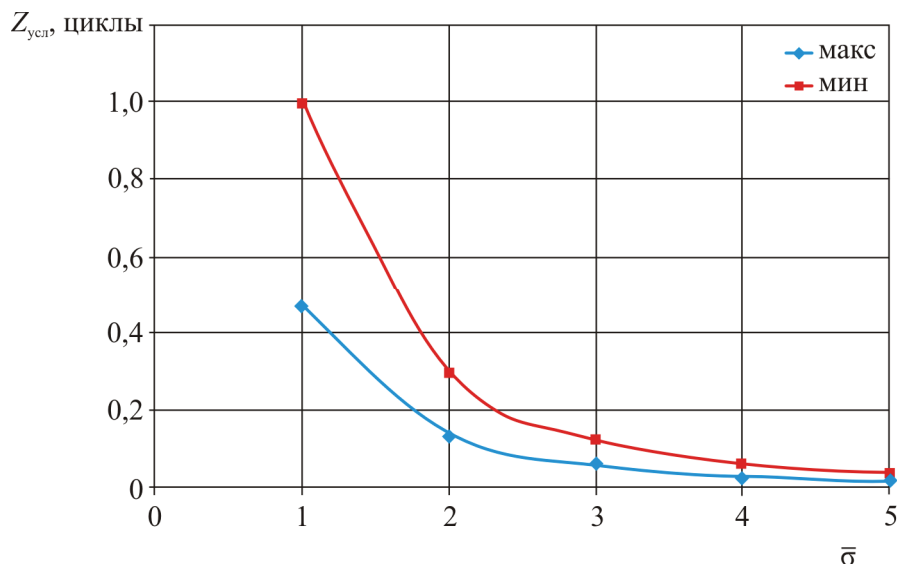


Рис. 6. Значения остаточного ресурса для расчетной зоны стрелы

Плотность распределения случайной величины  $Z_a$  определяем по соотношению

$$f(Z_a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Z_a - m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где  $\sigma$ ,  $m$  – соответственно квадратическое отклонение и математическое ожидание случайной величины  $Z_a$ . Параметры  $\sigma$  и  $m$  определены на основе «правила трех сигм».

Полученные результаты указывают на зоны повышенного риска, связанные с большой дисперсией остаточного ресурса и малыми напряжениями в расчетной зоне. В этом случае риск высокий как для производителя КМУ, так и для потребителя. Дальнейшее повышение нагрузок и уменьшение дисперсии остаточного ресурса приводит к изменению уровня риска принятия решения о дальнейшей эксплуатации машины. Рост параметров НДС уменьшает дисперсию расчетного остаточного ресурса и ведет к его снижению.



Функции плотности вероятности остаточного ресурса  $Z_{\text{усл}}$  (циклы) в зависимости от этапа нагружения  $\bar{\sigma}$  расчетной зоны стрелы КМУ приведены на рис. 7.

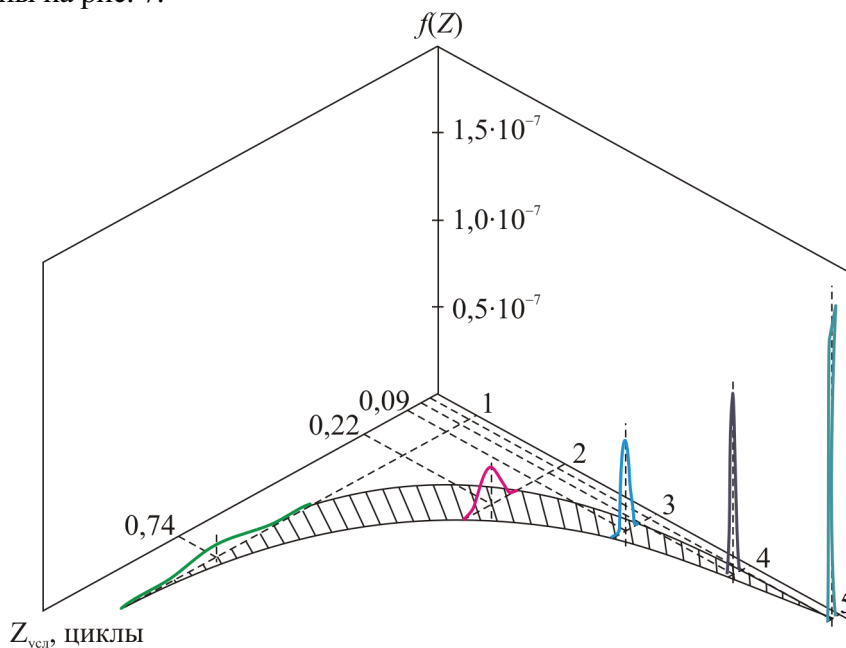


Рис. 7. Плотность вероятности остаточного ресурса узла КМУ в принятой зоне анализа возможных напряжений

На третьем этапе устанавливаем количественные показатели условного риска принятия решений по назначению расчетного остаточного ресурса металлоконструкции КМУ.

При наличии плотностей распределения случайной величины остаточного ресурса, соответствующих различным НДС расчетной зоны конструкции, рассмотрим вариант определения условного риска построением оценочной функции. В качестве параметра принимаем доверительный интервал и от «точечной» оценки остаточного ресурса переходим к определению признаков отношений (расстояние, различия) между доверительными интервалами при одинаковой доверительной вероятности во всех рассматриваемых эпизодах НДС расчетной зоны КМУ.

Показатель условного риска конструируем таким образом, чтобы он удовлетворял следующим требованиям: зависел от уровня НДС рассматриваемой зоны конструкции и доверительных вероятностей слу-

чайных величин остаточного ресурса; был инвариантен к параметрам, определяющим закономерности связей уровней НДС и остаточного ресурса конструкции; изменялся в диапазоне от 0 до 1.

Доверительные интервалы для множества возможных состояний по нагрузке расчетной зоны КМУ определяем по статистическим таблицам нормального закона распределения случайной величины.

Для установления отношений между состоянием металлоконструкции (по параметрам НДС) и доверительными интервалами остаточного ресурса представим область изменения параметров в виде, приведенном на рис. 8, где  $J_\beta$  – доверительный интервал,  $\beta$  – доверительная вероятность.

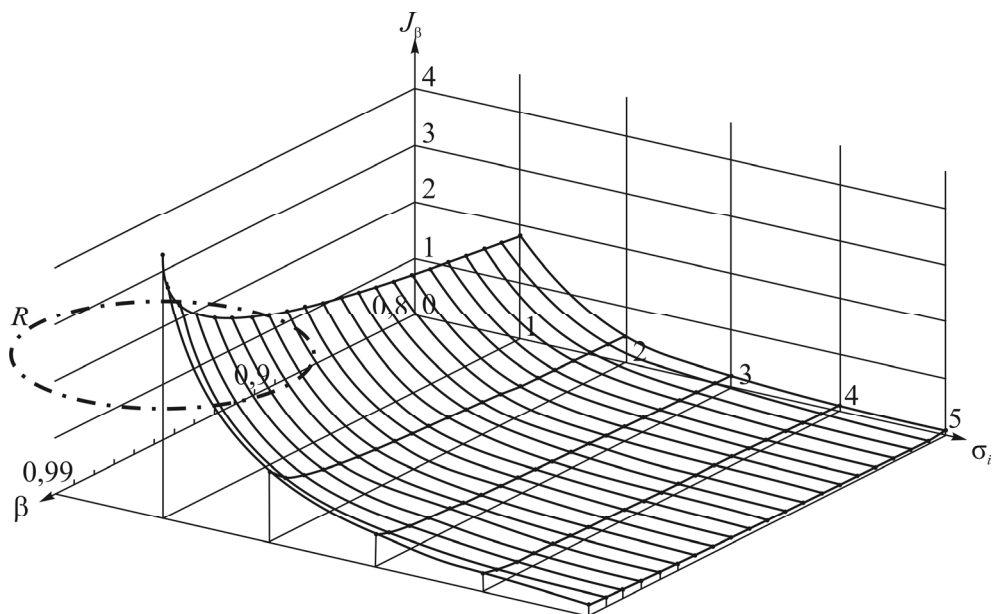


Рис. 8. Область изменения параметров

Зона  $R$  – зона низких напряжений и высоких доверительных интервалов остаточного ресурса, для которых характерно усложнение технического обслуживания в условиях эксплуатации и снижение суммарной производительности машины. Эту зону следует считать показателем, относительно которого возможно определить степень условного риска ресурсных расчетов.

На основании данных о доверительных интервалах построим матрицу решений в соответствии с правилом оценки риска по критерию Сэвиджа (табл. 3).

## Матрица решений

Уровень НДС	Доверительная вероятность				
	$\beta_1$	$\beta_2$	...	$\beta_k$	$\Delta J_{\beta ik}$
$\overline{\sigma}_1$	$J_{\beta 11}$	$J_{\beta 12}$	...	$J_{\beta 1k}$	$\Delta J_{\beta 1k}$
$\overline{\sigma}_2$	$J_{\beta 21}$	$J_{\beta 22}$	...	$J_{\beta 2k}$	$\Delta J_{\beta 2k}$
...	...	...	...	...	...
$\overline{\sigma}_j$	$J_{\beta j1}$	$J_{\beta j2}$	...	$J_{\beta jk}$	$\Delta J_{\beta jk}$

Варианты решения определяются по соотношению

$$Z_0 = \left\{ Z_{j0} \mid Z_{j0} \in Z \wedge J_{\beta j0} = \max_j J_{\beta jk} \right\}.$$

Оценочная функция имеет вид

$$J_{\beta} = \min_j J_{\beta jr} = \min_j [\max_k (\max_j J_{\beta jk} - J_{\beta jk})].$$

Здесь  $\Delta J_{\beta jk}$  – наибольшие разности, получаемые вычитанием элемента матрицы из наибольшего результата  $\max_j J_{\beta jk}$ .

Величину условного риска представим в виде

$$r_{\text{np}} = \frac{\Delta J_{\beta jk}^{\text{r}} - \Delta J_{\beta jk}^{\text{min}}}{\Delta J_{\beta jk}^{\text{max}} - \Delta J_{\beta jk}^{\text{min}}}, \quad (3)$$

где  $\Delta J_{\beta jk}^{\text{r}}$  – текущая разность.

Рыночные отношения и приватизация эксплуатирующих КМУ организаций создали условия не планирования ремонтных услуг и режимов технического обслуживания техники, а покупку услуг (сервис) на выполнение профилактических и восстановительных работ. В случае КМУ эта система формируется стихийно, при слабом контроле надзорных органов. Но создание системы сервиса – объективная необходимость удовлетворения потребности машин в ремонте и достижения максимальной прибыли при эксплуатации КМУ. Оценочное суждение потребителя о способности машины удовлетворять техническим

требованиям характеризуется его потребительской ценностью. В условиях рынка основу объективной оценки составляет прибыль от использования техники.

Для КМУ определить конкретный показатель прибыльности сложно, так как ценовые затраты в значительной степени являются неопределенными.

Определение риска потребителя построим на основе модели остаточного ресурса КМУ на период нормальной эксплуатации машины. В этом случае не учитывается сопутствующий фактор – сервисное сопровождение.

Потребитель определяет уровень поглощения ресурса машины, минимизирует возможные потери доходности предприятия.

Такая ситуация характеризуется двумя значимыми показателями: ожидаемый доход и риск. Рассмотрим отношение к риску потребителя (эксперта) как склонное к риску. В этом случае представим расчетные параметры (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение остаточного ресурса) в форме матрицы (табл. 4) с указанием значения функции  $f(\sigma; m)$ . Функция имеет вид  $f(\sigma; m) = m + k\sigma^2$ .

Таблица 4

**Параметры решения и значения функции выбора**

Состояние конструкции (НДС)	Среднеквадратическое отклонение $\sigma$	Математическое ожидание $m$	$f(\sigma; m)$
1	$\sigma_1$	$m_1$	$f_1$
2	$\sigma_2$	$m_2$	$f_2$
3	$\sigma_3$	$m_3$	$f_3$
...	...	...	...
$n$	$\sigma_n$	$m_n$	$f_n$

Коэффициент  $k$  определяется из условия эквивалентности принятия решения:

$$f_i(\sigma; m) = f_j(\sigma; m),$$

где  $i$  и  $j$  соответствуют функциям, которым придается формальная эквивалентность.

Таким образом, установлены параметры  $q$  достижения максимального дохода от эксплуатации КМУ. Условный риск определим по соотношению

$$r_{\text{пот}} = 1 - q, \quad (4)$$

$$\text{где } q = \frac{f^r(\sigma, m) - f^{\min}(\sigma, m)}{f^{\max}(\sigma, m) - f^{\min}(\sigma, m)}.$$

Результаты расчетов условных рисков по (3) и (4) производителя и потребителя в зависимости от состояния металлоконструкции приведены на рис. 9.

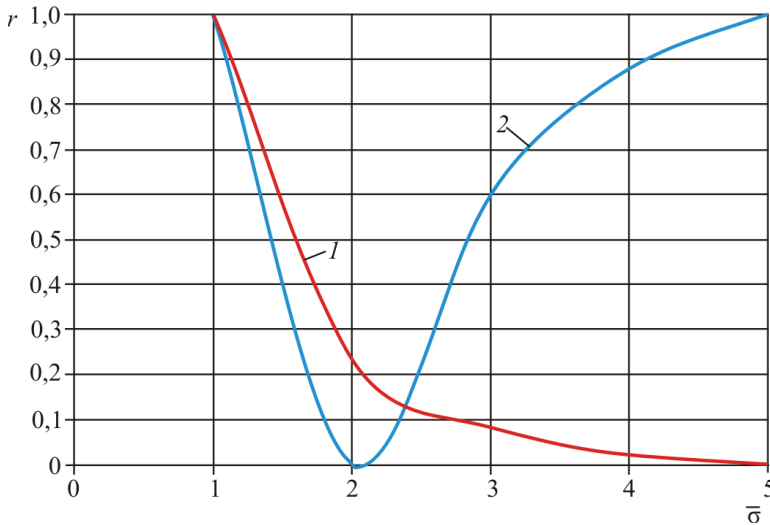


Рис. 9. Расчетный условный риск: 1 – условный риск производителя; 2 – условный риск потребителя

На рис. 9 видно, что условные риски производителя и потребителя являются сложными зависимостями от напряженного состояния расчетной зоны и, следовательно, остаточного ресурса и имеют сектор достаточно низких сбалансированных значений. При увеличении нагрузок риск производителя снижается, но вместе с этим снижается остаточный ресурс металлоконструкции с требованием повышения точности определения факторов НДС. Условный риск потребителя в этом случае возрастает, достигая предельных (не допустимых) значений, что также свидетельствует о тщательности мониторинга и диагностирования изделия с необходимым уменьшением остаточного ресурса эксплуатации КМУ при принятии решений по данным о состоянии рассматриваемой расчетной зоны. Представленные результаты адекватны оценке остаточного ресурса КМУ в практических ситуациях.

**Выводы.** Метод позволяет на этапе проектирования металлоконструкции КМУ оценить остаточный ресурс расчетной зоны по условной мере риска назначения срока эксплуатации невосстанавливаемых объектов, что ведет к повышению уровня безопасной эксплуатации машины. Приведенный подход основан на расчете ресурса металлоконструкции по критерию трещиностойкости при нестационарном циклическом нагружении. Оценка условного риска может быть полезна при анализе на ограниченную долговечность и для различных уровней детализации моделирования напряженного состояния зон конструкции.

В рамках принятых допущений метод позволяет formalизовать процесс оценки остаточного ресурса в комплексе и рассматривать ситуацию как логически связанную функционально-техническую и функционально-стоимостную систему, описывающую на этапе проектирования возможные сценарии развития процессов жизненного цикла КМУ.

Созданный программный продукт для работы с IT-технологиями с учетом альтернатив, обобщающих самые различные сведения о методах расчета металлоконструкции и условий эксплуатации в режимах компьютерной реализации позволяет формировать логические выводы о возможности безопасной эксплуатации машины.

Расчет условных рисков не подменяет собой систему наблюдения и надзора за безопасностью КМУ, а расширяет ее возможности. На этапе проектирования возможно формировать рекомендации о безопасной эксплуатации новой техники и определять остаточный ресурс эксплуатируемых машин с выполнением требований классификационного общества и органов государственного надзора.

Комплексный подход определения рисков остаточного ресурса с учетом физики отказов, расчетов параметров НДС, применения вероятностных методов и экспертных оценок можно использовать для любых других деталей и узлов проектируемых машин и конструкций.

Работа ориентирована не на создание новых методик расчета параметров НДС, анализа риска и модификацию существующих, а на конкретную предметную область и особенность практической задачи.

### **Список литературы**

1. Слобожанинов В.В. Как выбрать гидроманипулятор? //Лесной Урал. – 2006. – №3 (23). – С. 12.

2. Щеткин Р.В. Основные проблемы сертификации автомобильных кранов-манипуляторов и пути их решения при организации серийного производства // Вестник ПГТУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – Пермь, 2010. – №2. – С. 46–60.

3. Махутов Н.А. Диагностика материалов и состояния конструкций в задачах мониторинга рисков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77, №12. – С. 3–4.

4. Соколов С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин: учеб. пособие. – СПб.: Политехника, 2005. – 423 с.

5. Кычкин В.И., Рыбинская Л.А. Диагностика технического состояния металлоконструкций строительных и дорожных машин. Оценка остаточного ресурса с учетом риска: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 162 с.

Получено 28.02.2012