

УДК 630\*377.44.001

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ГИДРОМАНИПУЛЯТОРА БЕСЧОКЕРНОГО ТРЕЛЕВОЧНОГО ТРАКТОРА ТБ-1 В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

В. С. КРАЛИН, Ю. Н. ЛОГИНОВ

Уральский лесотехнический институт

Низкая надежность лесозаготовительных машин, оборудованных манипуляторами, — одна из причин снижения их производительности до 30 % [4]. Поэтому важно знать уровень надежности, а также его изменение при модернизации машин и в разных условиях их эксплуатации.

Цель данной статьи — количественная оценка вероятности безотказной работы металлоконструкции гидроманипулятора бесчokerного трелевочного трактора ТБ-1 в реальных условиях эксплуатации. В настоящее время для этого чаще всего используют непараметрические методы оценки надежности, основанные на статистике отказов, которая не позволяет проанализировать влияние конструктивных и технологических параметров на вероятность безотказной работы лесозаготовительных машин.

Использование параметрических методов осложнено наличием громоздкого математического аппарата и чрезвычайно большим объемом исходной статистической информации о динамической нагруженности машин, которую довольно сложно получить в реальных условиях эксплуатации.

В общем виде вероятность безотказной работы металлоконструкции гидроманипулятора ТБ-1 ( $R$ ) выражается формулой [2]

$$R = \int_0^{\infty} f(\sigma) \left[ \int_0^{\infty} f(r) dr \right] d\sigma = \int_0^{\infty} f(r) \left[ \int_0^r f(\sigma) d\sigma \right] dr, \quad (1)$$

где  $f(\sigma)$  — плотность распределения напряжений  $\sigma$ ;

$f(r)$  — плотность распределения несущей способности  $r$ .

Анализ формулы (1) показывает, что для определения ( $R$ ) достаточно знать плотность распределения  $f(r)$  несущей способности  $r$  и плотность распределения  $f(\sigma)$  напряжений  $\sigma$ . Под несущей способностью металлоконструкции в данной задаче понимается одна из важнейших механических характеристик — предел текучести  $\sigma_T$  материала. В справочной литературе [1] приводятся параметры и вид закона распределения величины  $\sigma_T$  для различных материалов. В большинстве случаев предел текучести  $\sigma_T$  низколегированных сталей достаточно точно описывается нормальным законом распределения. Вид закона распределения действующих напряжений определяют экспериментальным путем. Анализ данных, приведенных в литературе [3], показал, что в большинстве случаев напряжения, действующие в металлоконструкции лесозаготовительных машин, подчиняются нормальному закону распределения. В случае нормального распределения величин  $\sigma$  и  $r$  формула для определения вероятности безотказной работы имеет вид [2]

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\mu_r - \mu_\sigma}{\sqrt{D_r + D_\sigma}}}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \Phi\left(\frac{\mu_r - \mu_\sigma}{\sqrt{D_r + D_\sigma}}\right), \quad (2)$$

где  $\mu_\sigma$ ,  $\mu_r$  — математические ожидания напряжений и несущей способности, МПа;  
 $D_\sigma$ ,  $D_r$  — дисперсии напряжений и несущей способности, МПа<sup>2</sup>;  
 $\Phi$  — функция Лапласа.

Анализ формулы (2) показывает, что для определения  $R$  достаточно знать четыре величины:  $\mu_r$ ,  $\mu_\sigma$ ,  $D_r$ ,  $D_\sigma$ . Значения  $\mu_r$ ,  $D_r$  принимают из литературных источников, а значения  $\mu_\sigma$ ,  $D_\sigma$  наиболее достоверно определяют экспериментально. При использовании методов параметрической надежности для анализа влияния на вероятность безотказной работы конструктивно-технологических решений, реализованных в гидроманипуляторе лесозаготовительных машин, и изменений, неизбежных в процессе модернизации машин, целесообразно определять не напряжения, действующие в металлоконструкции, а математические ожидания и дисперсии сил и нагрузок, а затем по одной из известных теорий прочности аналитически определять эквивалентные напряжения. В лесном машиностроении при определении эквивалентных напряжений  $\sigma_i$  широкое распространение получила теория наибольших касательных напряжений

$$\sigma_i = (\sigma_{x_i}^2 + 4\tau_{x_i}^2)^{0,5}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{x_i}$ ,  $\tau_{x_i}$  — соответственно нормальные и касательные напряжения в  $i$ -м расчетном сечении гидроманипулятора, МПа.

Этот подход положен в основу экспериментального метода оценки вероятности безотказной работы гидроманипулятора, в котором параметры распределения, а именно математические ожидания и дисперсии сил и нагрузок, находили опытным путем с помощью многоканального электронно-цифрового счетного тензомера. Экспериментальные исследования проводили летом 1987 г. на машиноиспытательной станции ПО Онежский тракторный завод. Вероятностные характеристики эквивалентных напряжений в сечениях определяли по аналитическим зависимостям, полученным применением метода статистической линеаризации к формуле для эквивалентных напряжений (3). Сущность этого метода заключается в использовании разложения функции случайных аргументов  $y = f(x_i)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  в ряд Тейлора с сохранением только линейных членов ряда. Расчетные зависимости математического ожидания и дисперсии с приемлемой для технических приложений точностью были определены по формулам

$$\mu_y = f(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \mu_{x_3}, \dots, \mu_{x_n}); \quad (4)$$

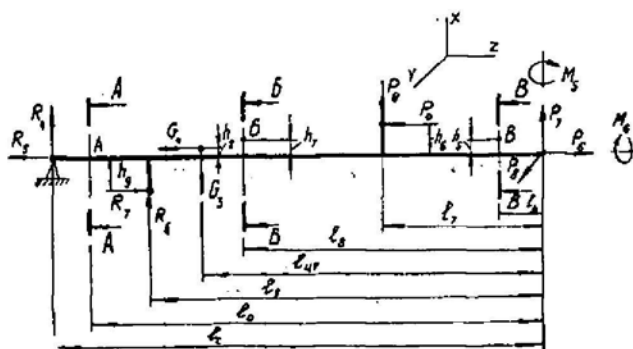
$$D_y = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \Big|_{x_i = \mu_{x_i}} \right)^2 D_{x_i}, \quad (5)$$

где  $\mu_y$ ,  $D_y$  — момент ожидания и дисперсия величины  $y$ ;  
 $\mu_{x_i}$ ,  $D_{x_i}$  — момент ожидания и дисперсия возмущающих параметров  $x_i$ .

При этом предполагали, что возмущающие параметры математической модели некоррелированы между собой и, что особенно важно, подчиняются нормальному закону распределения. При использовании

метода статистической линеаризации считали также, что из-за малости коэффициентов вариации линейных размеров гидроманипулятора ТБ-1 (длины элементов, расстояний, характеризующих точки крепления гидроцилиндров, размеров сечений) эти аргументы детерминированы. Исключение составляет толщина материала, коэффициент вариации которой достигает 5%. Напряжения в рукояти и стреле определяли по формуле (3) для любого по длине балки произвольного сечения.

Рис. 1



На рис. 1 представлена расчетная схема стрелы гидроманипулятора ТБ-1, где указаны сечения  $A-A$ ,  $B-B$ ,  $B-B$ , в которых устанавливали тензодатчики и записывали напряжения, действующие в различных точках по контуру сечений. Результаты расчетов достаточно хорошо (до 12%) согласуются с данными экспериментального исследования динамической нагруженности металлоконструкции гидроманипулятора.

На рукояти было выбрано два сечения:  $\Gamma-\Gamma$  в непосредственной близости от места крепления кронштейна на консоли рукояти и  $\Delta-\Delta$  рядом с кронштейном крепления рукояти на стреле. В качестве примера ниже даны выражения для момента ожидания и дисперсии эквивалентных напряжений в сечении  $B-B$ .

Момент ожидания эквивалентных напряжений в сечении  $B-B$  стрелы имеет вид

$$\mu_{\sigma_{B-B}} = [A^2 + 4(B^2 + C^2)]^{1/2}; \quad (6)$$

$$A = D + E + I; \quad (7)$$

$$B = F + G; \quad (8)$$

$$C = \frac{\mu_{M_3}}{\mu_{W_{кр}}}; \quad (9)$$

$$D = \frac{\mu_{P_1}}{\mu_{FB}}; \quad (10)$$

$$E = \frac{(-\mu_{P_2} l_6 - \mu_{P_3} h_6) x_3}{\mu_{J_y}}; \quad (11)$$

$$I = \frac{(\mu_{P_2} l_6 - \mu_{M_3}) y_3}{\mu_{J_x}}; \quad (12)$$

$$F = \frac{-\mu_{P_2} \mu_{S(x)}}{\mu_{J_y} \mu_b(x)}; \quad (13)$$

$$G = \frac{\mu_{P_0} \mu_S(y)}{\mu_{I_x} \mu_a(y)}. \quad (14)$$

Дисперсия эквивалентных напряжений в сечении В—В стрелы

$$D_{\sigma_{B-B}} = \frac{1}{4\mu_{\sigma_{B-B}}^2} \left\{ \left[ 2A \left( \frac{1}{\mu_{FB}} - \frac{x_3 h_5}{\mu_{J_y}} \right) \right]^2 D_{P_0} + \left[ 2A \left( -\frac{\mu_{P_0}}{\mu_{FB}^2} \right) \right]^2 D_{F_{FB}} + \right. \\ \left. + \left[ 2A \left( -\frac{x_3 l_0}{\mu_{J_y}} \right) + 8B \left( \frac{F}{\mu_{P_1}} \right) \right]^2 D_{P_1} + \left[ 2A \left( -\frac{E}{\mu_{J_y}} \right) + \right. \right. \\ \left. + 8B \left( -\frac{F}{\mu_{J_y}} \right) \right]^2 D_{J_y} + \left[ 2A \left( \frac{y_3 l_6}{\mu_{I_x}} + \frac{G}{\mu_{P_0}} \right) \right]^2 D_{P_0} + \left[ 2A \left( -\frac{y_3}{\mu_{I_x}} \right) \right]^2 D_{M_0} + \\ \left. + \left[ 2A \left( -\frac{I}{\mu_{I_x}} \right) + 8B \left( -\frac{G}{\mu_{I_x}} \right) \right]^2 D_{I_x} + \left[ -8B \frac{F}{\mu_S(x)} \right]^2 D_{S(x)} + \right. \\ \left. + \left[ 8B \frac{F}{\mu_{B(x)}} \right]^2 D_{b(x)} + \left[ 8B \left[ \frac{G}{\mu_S(y)} \right]^2 D_{S(y)} + \left[ -8B \frac{G}{\mu_a(y)} \right]^2 D_{a(y)} + \right. \right. \\ \left. + \left[ \frac{8B}{\mu_{W_{кр}}} \right]^2 D_{M_0} + \left[ -8B \frac{C}{\mu_{W_{кр}}} \right]^2 D_{W_{кр}} \right\}, \quad (15)$$

где  $\mu_{P_0}, \mu_{P_1}, \mu_{P_0}, D_{P_0}, D_{P_1}, D_{P_0}$  — моменты ожидания и дисперсии сил, действующих на стрелу;

$\mu_{M_0}, \mu_{M_0}, D_{M_0}, D_{M_0}$  — моменты ожидания и дисперсии моментов, действующих на стрелу;

$\mu_{FB}, \mu_{J_y}, \mu_{I_x}, \mu_S(x), \mu_S(y), \mu_{W_{кр}}, \mu_{b(x)}, \mu_a(y), D_{FB}, D_{J_y}, D_{I_x}, D_{S(x)}, D_{S(y)}, D_{W_{кр}}, D_{b(x)}, D_{a(y)}$  — моменты ожидания и дисперсии геометрических характеристик сечения В—В стрелы.

Аналогичным образом были определены выражения для моментов ожидания и дисперсий каждого из опасных сечений гидроманипулятора ТБ-1. Расчет выполняли на ЭВМ «Искра-226». Результаты расчета с учетом коэффициента концентрации напряжений в указанных сечениях приведены в таблице.

Расчетные значения вероятности безотказной работы поперечных сечений стрелы и рукояти гидроманипулятора

Сечение	Номер точки по контуру сечения	Момент ожидания эквивалентного напряжения, МПа	Среднее квадратичное отклонение эквивалентного напряжения, МПа	Функция Лапласа	Вероятность безотказной работы
А—А	7	71,88	46,24	4,918	0,9(6)*
Б—Б	4	15,76	26,53	8,661	0,9(6)
В—В	5	31,78	36,48	6,854	0,9(6)
Г—Г	3	35,85	15,64	9,587	0,9(6)
Д—Д	1	31,26	15,78	9,744	0,9(6)

\* 0,9(6) = 0,999999.

Анализ этих результатов показал, что вероятность безотказной работы опасных сечений выше нормативных значений (от 0,999 до 0,9999). Разные значения  $R$ , полученные в результате расчетов, указывают на неравнопрочность сечений. Как отмечено выше, параметриче-

ский метод позволяет произвести количественный анализ влияния того или иного параметра системы на вероятность безотказной работы гидроманипулятора, например, толщины материала, несущей способности, геометрических характеристик сечений и др.

На рис. 2 показана зависимость влияния толщины материала ( $t$ ) в рассматриваемых сечениях гидроманипулятора ТБ-1 на  $R$ . На графике хорошо видна неравнопрочность сечений металлоконструкции, а также, что для данного материала (низколегированная сталь 15ХСНД  $\mu_{\sigma_c} = 350$  МПа,  $\sigma_{\sigma_T} = 28$  МПа) толщина материала без ущерба безотказности гидроманипулятора может быть уменьшена с 7 мм (как у серийного) до 4,8 мм. Однако при этом необходимо оценить, как это уменьшение скажется на устойчивости его металлоконструкции.

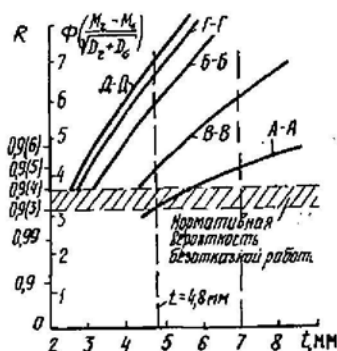


Рис. 2

### Выводы

1. Вероятность безотказной работы сечений гидроманипулятора ТБ-1 выше нормативных значений, что указывает на возможность снижения его массы на 18...20%. Это может быть обеспечено в результате изменения геометрических характеристик сечений, уменьшения толщины материала, улучшения прочностных характеристик используемых материалов и технологии изготовления сварных швов.

2. Вероятность безотказной работы не одинакова для различных сечений, что указывает на их неравнопрочность. Для достижения равнопрочности сечений необходимо изменить параметры поперечных сечений или применить профили проката с переменной толщиной.

### ЛИТЕРАТУРА

[1]. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и размеров сортамента: Справочник / Под ред. С. О. Охапкина.— М.: Машиностроение, 1970.— 526 с. [2]. Калур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем / Пер с англ.— М.: Мир, 1980.— 604 с. [3]. Кралин В. С. Влияние механических характеристик применяемых материалов на материалоемкость лесных машин // Лесн. журн.— 1987.— № 1.— С. 37—42.— (Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Кушляев В. Ф. Лесозаготовительные машины манипуляторного типа.— М.: Лесн. пром-сть, 1981.— 248 с.

Поступила 27 февраля 1989 г.

УДК 630\*372/375

## К ВОПРОСУ О ТРАНСПОРТЕ ЛЕСА В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

В. А. ГОРДИЕНКО

Кавказский филиал ВНИИЛМ

Народнохозяйственная роль горных лесов очень разнообразна и обусловлена как природными, так и экономическими особенностями. По данным учета лесного фонда на 1 января 1978 г., горные леса Северного Кавказа по крутизне склонов распределяются следующим образом: на склонах до  $10^\circ$  расположено 18,6%, от  $11$  до  $20^\circ$  — 32,3%, от  $21$  до  $30^\circ$  — 27,9%, на склонах круче  $30^\circ$  — 21,2%.