

ИГОРЬ ГЕННАДЬЕВИЧ СКОБЦОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
iskobtsov@mail.ru

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ROPS ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН С ПОЗИЦИЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ*

Работа посвящена оценке показателей надежности лесных машин с применением методов линейной механики разрушения. Во введении представлены основные уравнения силового подхода механики разрушения, связывающие коэффициент интенсивности напряжений с длиной трещиноподобного дефекта. Вторая часть статьи посвящена получению аналитических зависимостей для оценки вероятности безотказной работы в предположении, что вязкость разрушения и коэффициент интенсивности напряжений являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону. Для определения параметров распределения случайных величин (математических ожиданий и дисперсий) использован метод статистической линеаризации. В заключительной части приведена оценка вероятности безотказной работы на примере ROPS (устройства защиты оператора при опрокидывании) гусеничного трелевочного трактора. Интенсивность напряжений в конструкции определена с применением метода конечных элементов. Проведены расчеты для различных типов трещин: граничной краевой, сквозной и полуэллиптической. Показано, что наличие трещиноподобных дефектов, даже при небольших длинах, снижает вероятность безотказной работы.

Ключевые слова: механика разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, показатели надежности, проектирование, устройство защиты при опрокидывании

ВВЕДЕНИЕ

Для лесной техники, работающей в условиях сильнопересеченной местности, характерны такие аварийные ситуации, как опрокидывание машин или падение на них тяжелых предметов. Действующие нормативно-технические документы, регламентирующие требования к безопасности операторов лесных машин, предписывают оснащать кабины устройствами защиты при опрокидывании (ROPS – Roll-over protective structures) для снижения риска травмирования в случае возникновения аварийной ситуации. Так, стандартом ИСО 8082 допускается проведение статических лабораторных испытаний ROPS при боковом, вертикальном и продольном нагружении, при этом одним из главных требований является неразрушение конструкции ROPS при испытаниях.

Методам оценки показателей безотказности с позиций механики разрушения посвящены работы В. В. Болотина [1], А. В. Питухина [3], [4] и ряда других авторов. В работе [4] отмечается, что материалы реальных конструкций еще до начала эксплуатации имеют несовершенства в виде несплошностей, инородных неметаллических включений, раковин, газовых пор, дефектов сварки и механической обработки. Трещины могут развиваться в зонах действия наибольших механических напряжений, инициируясь на дефектах различного рода, которые можно рассматривать

как элементы начала разрушения (первоначальные трещины малого размера). В то же время одним из важнейших показателей безотказности является вероятность безотказной работы R , при решении задач оптимизации он зачастую входит в целевую функцию [8], [9], [10], поэтому представляется целесообразной разработка метода оценки вероятности безотказной работы конструкции ROPS в зависимости от длины и вида трещины.

В механике разрушения в зависимости от степени пластической деформации различают хрупкий, квазихрупкий и вязкий механизмы разрушения в условиях однократного воздействия постоянно возрастающей нагрузки. В работе А. Гриффитса представлен энергетический подход для описания механизма хрупкого разрушения при наличии трещины. Последующие исследования Дж. Ирвина привели к созданию концепции квазихрупкого разрушения и силового подхода, получившего наиболее широкое распространение в инженерных приложениях и связанного с использованием такого критерия, как коэффициент интенсивности напряжений K_I . Согласно Дж. Ирвину, трещина начнет распространяться, если значение коэффициента интенсивности напряжений K_I достигнет критического значения K_{IC} :

$$K_I = K_{IC}.$$

Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} считается постоянной величиной для данного материала, его значения приведены в литературе [5] для различных материалов.

Коэффициент интенсивности напряжений определяется по формуле

$$K_I = Y_I(l) \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (1)$$

где $Y_I(l)$ – коэффициент, учитывающий длину трещины и геометрическую форму детали; σ – нормальное напряжение, растягивающее трещину; l – длина (полудлина) трещины.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Оценим вероятность безотказной работы в предположении, что плотность распределения вязкости разрушения материала элемента ROPS $f_1(K_{IC})$ и коэффициента интенсивности напряжений $f_2(K_I)$ известны и статистически независимы. В данном случае вероятность безотказной работы можно выразить как вероятность того, что коэффициент интенсивности напряжений K_I не превысит вязкости разрушения K_{IC}

$$R = \Pr\{K_{IC} \geq K_I\} = \Pr\{K_{IC} - K_I \geq 0\}.$$

Вероятность того, что коэффициент интенсивности напряжений находится в интервале

$$\Pr\left(K_I^0 - \frac{dK_I}{2} \leq K_I \leq K_I^0 + \frac{dK_I}{2}\right) = f_2(K_I^0) dK_I.$$

Вероятность того, что вязкость разрушения K_{IC} превысит некоторое значение коэффициента интенсивности напряжений K_I^0

$$\Pr\{K_{IC} \geq K_I^0\} = \int_{K_I^0}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC}.$$

Вероятность того, что значение коэффициента интенсивности напряжений K_I заключено в малом интервале dK_I , а вязкость разрушения K_{IC} превышает коэффициент интенсивности напряжений, задаваемый этим интервалом, имеет вид

$$f_2(K_I^0) dK_I \int_{K_I^0}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC}.$$

Вероятность безотказной работы есть вероятность того, что вязкость разрушения K_{IC} превысит коэффициент K_I для всех его возможных значений

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(K_I) \left[\int_{K_I}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC} \right] dK_I.$$

Зависимость для оценки вероятности безотказной работы при однократном нагружении можно получить путем интегрирования по K_{IC} :

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(K_{IC}) \left[\int_{-\infty}^{K_{IC}} f_2(K_I) dK_I \right] dK_{IC}.$$

Принимая во внимание, что вязкость разрушения – положительная величина, а разрушение по l типу раскрытия трещины на практике происходит при больших положительных напряжениях, в двух последних полученных формулах в нижних пределах интегрирования можно вместо « $-\infty$ » указать «0».

Получим зависимость для оценки вероятности отказа Q исходя из соображения, что возникновение отказа и его отсутствие образуют полную группу событий, то есть $R + Q = 1$.

Исходя из свойств плотности распределения можно записать

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC} = \int_{-\infty}^{K_I} f_1(K_{IC}) dK_{IC} + \int_{K_I}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC} = 1.$$

Следовательно,

$$\int_{K_I}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC} = 1 - F_1(K_I),$$

где $F_1(K_I)$ – функция распределения вязкости разрушения.

Подставим полученное выражение в формулу для вероятности безотказной работы

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(K_I) [1 - F_1(K_I)] dK_I = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_2(K_I) F_1(K_I) dK_I,$$

и, таким образом, вероятность отказа

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(K_I) F_1(K_I) dK_I.$$

Формулу для оценки вероятности безотказной работы можно выразить через функцию распределения коэффициента интенсивности напряжений

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(K_{IC}) F_2(K_{IC}) dK_{IC}.$$

Если величины K_I и K_{IC} распределены по нормальному закону с математическими ожиданиями \bar{K}_I , \bar{K}_{IC} и дисперсиями $\sigma_{K_I}^2$, $\sigma_{K_{IC}}^2$, то их плотности распределений

$$f_1(K_{IC}) = \frac{1}{\sigma_{K_{IC}} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(K_{IC} - \bar{K}_{IC})^2}{2\sigma_{K_{IC}}^2}\right],$$

$$f_2(K_I) = \frac{1}{\sigma_{K_I} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(K_I - \bar{K}_I)^2}{2\sigma_{K_I}^2}\right].$$

Введем случайную величину $Y = K_{IC} - K_I$. Она также будет распределена по нормальному закону с математическим ожиданием

$$\bar{y} = \bar{K}_{IC} - \bar{K}_I$$

и дисперсией

$$\sigma_y^2 = \sigma_{K_{IC}}^2 + \sigma_{K_I}^2.$$

Запишем функцию распределения случайной величины Y , используя нормированную функцию нормального распределения [2]

$$F(y) = \Phi^* \left(\frac{y - \bar{y}}{\sigma_y} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{y-\bar{y}}{\sigma_y}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Тогда вероятность безотказной работы с учетом нормального закона распределения случайной величины Y

$$R = \Pr\{y \geq 0\} = 1 - F(0) = 1 - \Phi^* \left(-\frac{\bar{y}}{\sigma_y} \right) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\frac{\bar{y}}{\sigma_y}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\bar{y}}{\sigma_y}}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Обозначим

$$z = -\frac{\bar{y}}{\sigma_y} = -\frac{\bar{K}_{IC} - \bar{K}_I}{\sqrt{\sigma_{K_{IC}}^2 + \sigma_{K_I}^2}} \quad (2)$$

и получим выражение для вероятности безотказной работы

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3)$$

Поскольку нормальная функция распределения $F(y)$ выражается через функцию Лапласа

$$F(y) = 0,5 + \Phi \left(\frac{y - \bar{y}}{\sigma_y} \right) = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{y-\bar{y}}{\sigma_y}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

вероятность безотказной работы можно представить в следующем виде

$$R = 0,5 - \Phi(z),$$

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Таким образом, для оценки вероятности безотказной работы при нормальном распределении величин K_I и K_{IC} необходимо знать их математические ожидания \bar{K}_I , \bar{K}_{IC} и дисперсии $\sigma_{K_I}^2$, $\sigma_{K_{IC}}^2$. Для вязкости разрушения параметры \bar{K}_{IC} и $\sigma_{K_{IC}}^2$ определяются экспериментальным путем, поскольку они являются характеристиками материала.

Найдем формулы для определения \bar{K}_I и $\sigma_{K_I}^2$ при условии, что известны математические ожидания и дисперсии действующих номинальных напряжений σ и длины трещины l : $\bar{\sigma}$, σ_{σ}^2 , \bar{l} , σ_l^2 .

На основании выражения (1) и с использованием метода статистической линеаризации получим

$$\bar{K}_I = Y_I \bar{\sigma} \sqrt{\pi \cdot \bar{l}}, \quad (4)$$

$$\sigma_{K_I}^2 = \left(Y_I \sqrt{\pi \cdot \bar{l}} \right)^2 \sigma_{\sigma}^2 + \left(Y_I \bar{\sigma} \sqrt{\frac{\pi}{4\bar{l}}} \right)^2 \sigma_l^2. \quad (5)$$

В случае квазихрупкого разрушения в вершине трещины образуется пластическая область, размеры ее можно оценить поправкой Ирвина:

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_T} \right)^2 \quad \text{— для плоской деформации;}$$

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_T} \right)^2 \quad \text{— для плоского напряженного состояния.}$$

Таким образом, при определении K_I следует использовать «условную» длину трещины, увеличивая начальную длину на величину r_p , то есть $l + r_p$. Поскольку длина трещины значительно превышает величину поправки r_p , можно принять допущение о ее детерминированности. Тогда математическое ожидание длины трещины определится суммой $\bar{l} + r_p$, а ее дисперсия не изменится.

ПРИМЕР ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

В качестве примера приведем расчет нагружения устройства защиты оператора гусеничного трелевочного трактора «Онежец 300» боковой силой $F = 70$ кН (согласно требованиям ИСО 8082). Поскольку ИСО 8082 допускает при испытаниях использование распределителей боковой нагрузки, имеющих длину до 80 % горизонтального расстояния между передней и задней стойками ROPS, можно сделать допущение о плоском напряженном состоянии конструкции. Рассмотрим три варианта возникновения трещин следующих типов: сквозной, полуэллиптической и граничной краевой. Схема образования трещин представлена на рис. 1.

Материал ROPS – сталь 15ХСНД с пределом прочности $\sigma_B = 800$ МПа, пределом текучести $\sigma_T = 380$ МПа и критическим коэффициентом интенсивности напряжений $K_{IC} = 44,6$ МПа $\cdot\sqrt{м}$ [5]. Моделирование напряженно-деформированного состояния ROPS «Онежец 300» было проведено автором в работе [7]. С использованием метода конечных элементов и программы «Зенит» оценена интенсивность механических напряжений. Поскольку зонами максимальных напряжений $\sigma_1^{\max} = 715$ МПа являются зоны задних опор для установки ROPS на раме трактора [7], оценку вероятности безотказной работы проведем при допущении о возможном месте локализации трещин в зоне максимальных напряжений (рис. 2).

Величина коэффициента K_I вычислялась по формуле (1) при следующих функциях $Y_I(l)$ [5]:

- для граничной краевой трещины – $Y_I(l) = 1,1215$;
- для сквозной трещины – $Y_I(l) = 1,0$;
- для полуэллиптической трещины –

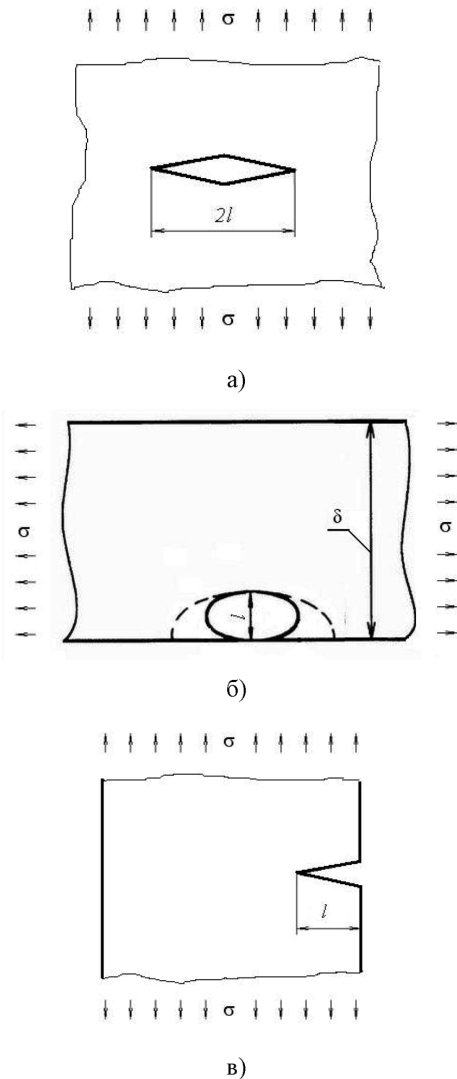


Рис. 1. Схемы образования трещин: а) сквозной; б) полуэллиптической; в) краевой

$$Y_l(l) = \frac{0,8}{1 - 0,5 \frac{l}{\delta}}$$

где δ – толщина стенки профильной трубы, $\delta = 8$ мм.

Таким образом, исходные данные для расчета по формулам (2)–(5):

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= 715 \text{ МПа}; \bar{K}_{IC} = 44,6 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}; \bar{l} = l \\ \sigma_{\sigma} &= 0,1 \bar{\sigma}; \sigma_{K_{IC}} = 0,1 \bar{K}_{IC}; \sigma_l = 0,1 \bar{l}. \end{aligned} \quad [6]$$

Результаты расчета вероятности безотказной работы устройства защиты оператора в зависимости от длины и вида трещины представлены на графике (рис. 3).

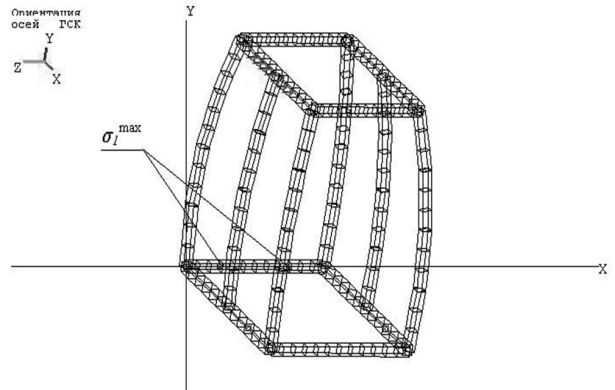


Рис. 2. Конечно-элементная модель ROPS «Онежец 300»

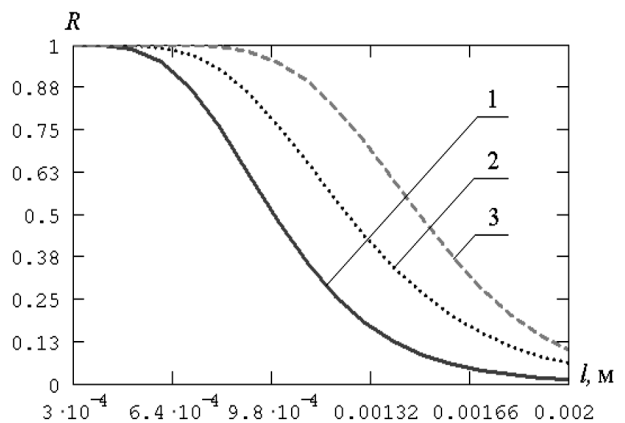


Рис. 3. График зависимости вероятности безотказной работы ROPS от длины и вида трещины: 1 – краевая; 2 – сквозная; 3 – полуэллиптическая

ВЫВОДЫ

Технологические дефекты в виде несплошностей, раковин, неметаллических включений, риск от механической обработки и т. п., присутствующих в реальных материалах еще до начала эксплуатации, влияют на прочность конструкций и могут рассматриваться как элементы начала разрушения. Методика, представленная в данной работе, позволяет проводить оценку вероятности безотказной работы при однократном нагружении ROPS лесозаготовительной машины. Расчет проведен на примере ROPS гусеничного трелевочного трактора «Онежец 300» для варианта возможной локализации в зоне максимальных напряжений трещин следующих видов: сквозной, граничной краевой, полуэллиптической. Как следует из результатов расчета, наличие дефектов в виде трещин, даже небольшой величины, существенно снижает вероятность безотказной работы.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) Петрозаводского государственного университета в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Книга по требованию, 2013. 312 с.
2. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
3. Питухин А. В. Оценка периода зарождения усталостной трещины от риска после механической обработки // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 1 (90). С. 111–113.
4. Питухин А. В., Скобцов И. Г., Хвоин Д. А. Оценка вероятности безотказной работы элементов конструкций с трещиноподобными дефектами // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 9 (103). С. 85–87.
5. Саврук М. П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами: Справ. пособие: В 4 т. Т. 2: Механика разрушения и прочность материалов / Под общ. ред. В. В. Панасюка. Киев: Наукова думка, 1988. 620 с.
6. Серенсен С. В., Кобаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 480 с.
7. Скобцов И. Г. Оценка несущей способности устройства защиты оператора лесопромышленного трактора с позиций механики разрушения // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2915.
8. Pitukhin A. V. Fracture Mechanics and Optimal Design // Int. Journal for Numerical Methods in Engineering. 1992. Vol. 34, № 3. P. 933–940.
9. Pitukhin A. V. Optimal Design Problems Using Fracture Mechanics Methods // Computers and Structures. 1997. Vol. 65, № 4. P. 621–624.
10. Pitukhin A. V., Skobtsov I. G. The Statement of Optimal Design Problem with the Cusp Catastrophe Theory Application // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 709. P. 530–533.

Skobtsov I. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ESTIMATION OF FOREST MACHINE ROPS RELIABILITY IN TERMS OF FRACTURE MECHANICS

This paper deals with the estimation of reliability measures in terms of fracture mechanics. The main fracture mechanics expressions linking stress intensity factor with the length of the crack like defect are presented in the introduction. Analytical equations evaluating the reliability function are obtained. The fracture toughness and the stress intensity factor are viewed as Gaussian random values in the second part of the paper. The statistical linearization method is used to determine distribution parameters (mean value, dispersion). The tracked skidder ROPS (roll-over protective structure) is used as an example of reliability function evaluation and is described in the last part of the paper. The stress intensity was estimated by the finite element method. Calculations are done for different types of cracks: through wall, edge and semi elliptic. It is shown that the presence of crack like defects, even of small length, reduces the level of reliability.

Key words: fracture mechanics, stress intensity factor, reliability measures, designing, roll-over protective structure (ROPS)

REFERENCES

1. Bolotin V. V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstruksiy* [Prediction of Machine and Construction Useful Life Span]. Moscow, Kniga po trebovaniyu Publ., 2013. 312 p.
2. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 479 p.
3. Pitukhin A. V. The Fatigue Crack Initiation Period Estimation Depending on the Mechanical Treatment Roughness [Otsenka perioda zarozhdeniya ustalostnoy treshchiny ot risok posle mekhanicheskoy obrabotki]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskije nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2008. № 1 (90). P. 111–113.
4. Pitukhin A. V., Skobtsov I. G., Khvoyn D. A. Survival function estimation of mechanical elements with crack like defects [Otsenka veroyatnosti bezotkaznoy raboty elementov konstruksiy s treshchinopodobnymi defektami]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskije nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2009. № 9 (103). P. 85–87.
5. Savruk M. P. *Koeffitsienty intensivnosti napryazheniy v telakh s treshchinami. Tom 2: Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov* [Stress Intensity Factors in Solids with Cracks. Vol. 2: Fracture Mechanics and Strength of Materials]: Resource book in 4 vol. / By V. V. Panasyuk edition. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 620 p.
6. Serensen S. V., Kobaev V. P., Shneyderovich R. M. *Nesushchaya sposobnost' i rascheti detaley mashin na prochnost'* [Load-carrying Capacity and Machine Element Strength Analysis]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 480 p.
7. Skobtsov I. G. The estimation of load-carrying capacity of forest machine roll-over protective structure from the point of fracture mechanics [Otsenka nesushchey sposobnosti ustroystva zashchity operatora lesopromyshlennogo traktora s pozitsiy mekhaniki razrusheniya]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2015. № 2. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2915.
8. Pitukhin A. V. Fracture Mechanics and Optimal Design // Int. Journal for Numerical Methods in Engineering. 1992. Vol. 34, № 3. P. 933–940.
9. Pitukhin A. V. Optimal Design Problems Using Fracture Mechanics Methods // Computers and Structures. 1997. Vol. 65, № 4. P. 621–624.
10. Pitukhin A. V., Skobtsov I. G. The Statement of Optimal Design Problem with the Cusp Catastrophe Theory Application // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 709. P. 530–533.

Поступила в редакцию 06.05.2015