

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7343

УДК 630.2

Статья

## Исследование надёжности модульной системы пожаротушения на базе форвардера Амкодор-2661

**Скобцов Игорь Геннадьевич**

*доктор технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), [iskobtsov@mail.ru](mailto:iskobtsov@mail.ru)*

**Галактионов Олег Николаевич**

*доктор технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), [galakt@petrstu.ru](mailto:galakt@petrstu.ru)*

**Сулконен Максим Сергеевич**

*магистрант кафедры транспортных и технологических машин и оборудования, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), [maks.sulkonen@list.ru](mailto:maks.sulkonen@list.ru)*

*Получена: 6 сентября 2023 / Принята: 3 ноября 2023 / Опубликовано: 25 ноября 2023*

---

**Аннотация:** Лесные пожары были и продолжают оставаться серьёзной мировой глобальной проблемой. В связи с этим проектирование современных машин для борьбы с огнём в лесу является актуальной задачей. Статья посвящена исследованию надёжности модульной системы пожаротушения на базе форвардера на стадии проектирования с использованием методов механики разрушения и теории возможностей. Во введении приведено обоснование и представлен ряд преимуществ использования колёсных форвардеров в качестве базовых машин для установки систем борьбы с лесными пожарами. В первой части статьи представлены основные уравнения силового подхода механики разрушения, связывающие коэффициент интенсивности напряжений с длиной трещиноподобного дефекта. Вязкость разрушения и длина дефекта рассмотрены как гауссовские случайные величины, наибольшее действующее напряжение представлено как нечёткая переменная с неизвестным законом распределения. Аналитические зависимости для оценки надёжности получены как оценка верхних и нижних границ значений вероятности безотказной работы. Реальное значение вероятности данного показателя находится внутри этого интервала. Во второй части статьи представлена оценка вероятности безотказной работы на примере конструкции несущей рамы модульной системы пожаротушения

на базе форвардера Амкодор-2661. Интенсивность напряжений в конструкции определена с применением метода конечных элементов, проведён расчёт для варианта наличия в материале конструкции дефекта в виде краевой трещины. Вычислен интервал значений вероятности безотказной работы, на практике важно знать наибольшее значение вероятности отказа и, соответственно, наименьшую — наиболее обеспеченную — вероятность безотказной работы конструкции. Предложенный метод может быть использован для оценки показателей надёжности элементов конструкций лесных машин при ограниченной статистической информации о нагруженности.

**Ключевые слова:** механика разрушения; коэффициент интенсивности напряжений; вязкость разрушения; нечёткая переменная

---

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7343

*Article*

## **Research of the reliability of a modular fire extinguishing system based on the forwarder Amkodor-2661**

**Igor Skobtsov**

*D. Sc. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation), [iskobtsov@mail.ru](mailto:iskobtsov@mail.ru)*

**Oleg Galaktionov**

*D. Sc. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation), [galakt@petsu.ru](mailto:galakt@petsu.ru)*

**Maxim Sulkonen**

*student in the master's program of the department of transport and technological machines and equipment, Petrozavodsk State University (Russian Federation), [maks.sulkonen@list.ru](mailto:maks.sulkonen@list.ru)*

*Received: 6 September 2023 / Accepted: 3 November 2023 / Published: 25 November 2023*

---

**Abstract:** Forest fires are still a serious global problem. Therefore, designing of modern forest fire fighting machines is an important problem. This paper deals with the investigation of reliability of forest fire fighting system at the design stage by using fracture mechanics and possibility theory application. Usage justification and some advantages of using wheeled forwarders as basic machines for the installation of forest fire fighting systems are presented in the introduction. The basic fracture mechanics equations linking stress intensity factor with crack-like defect length are presented in the first part of the paper. Fracture toughness and crack-like defect length are viewed as Gaussian random values; maximum applied stress is presented as a fuzzy variable with unknown distribution law. Analytical equations for reliability evaluation are obtained by estimation of upper and lower bounds of reliability function. The real value of this measure is located within this interval. The estimation of reliability function by the example of the supporting frame of a modular firefighting system based on forwarder Amkodor-2661 is presented in the second part of the paper. The stress intensity was determined by the finite element method. The calculation is carried out for the variant of presence of an edge type of crack in material. The interval of reliability function values is calculated. It is important to know the upper value of failure probability and, accordingly, the lower one as the most provided value of reliability function.

The proposed method may be used to assess the reliability of structural elements of forest machines with limited statistical information.

**Keywords:** fracture mechanics; stress intensity factor; fracture toughness; fuzzy variable

---

## 1. Введение

Стихийные бедствия в виде лесных пожаров ежегодно наносят большой ущерб бюджету Республики Карелия. Как показывают статистические данные, с 2012 по 2022 г. пики пожаров приходились на 2013 и 2021 гг., при этом только в 2021 г. площадь, поражённая пожарами, составила более 15 тыс. га [1]. Существует ряд направлений по повышению эффективности борьбы с огнём в лесу [2]. Одним из них является совершенствование технологий и технических средств для тушения лесных пожаров: использование для мониторинга БПЛА и искусственного интеллекта [3], применение дистанционно управляемых лафетных стволов и пожарных роботов, создание негорючих противопожарных барьеров, искусственное вызывание осадков, создание модульных систем пожаротушения на базе существующих лесных машин. В последнем случае следует отметить способ повышения эффективности путём установки модульной системы пожаротушения на базе форвардера — трелёвочной машины манипуляторного типа.

Преимущества в использовании колёсных форвардеров в качестве базовых машин для установки систем борьбы с лесными пожарами могут быть сформулированы следующим образом:

- колёсные форвардеры обладают более высокими скоростями перемещения в условиях лесной пересечённой местности по сравнению с гусеничными трелёвочными тракторами, в свою очередь, это позволяет форвардеру быстрее добраться до места возникновения лесного пожара и приступить к его локализации;
- колёсные форвардеры имеют более высокий тяговый класс по сравнению с гусеничными лесными машинами и, следовательно, бóльшую грузоподъёмность, что позволяет размещать в грузовом отсеке ёмкости для огнетушащего вещества большего объёма, а это повышает эффективность борьбы с огнём;
- наличие гидроманипулятора достаточной грузоподъёмности позволяет оперативно произвести погрузку и монтаж модульного комплекса для пожаротушения в грузовом отсеке форвардера без использования дополнительных погрузочных приспособлений, усложняющих конструкцию грузовой платформы;
- наличие достаточно вместительного грузового отсека позволяет произвести размещение в нём ёмкостей существенно большего объёма, насосной установки, дистанционно управляемого лафетного ствола, входящих в состав мобильного комплекса для тушения лесных пожаров;
- грузовые отсеки большинства форвардеров ведущих производителей имеют сходные конструкции и, таким образом, возникает возможность создания универсальной установки для пожаротушения в виде мобильного комплекса, использование которого возможно как в линейке форвардеров одного производителя, так и форвардеров разных фирм при условии сходной конструкции грузовых отсеков.

Следует отметить, что условия эксплуатации как лесозаготовительных, так и лесохозяйственных машин сильно варьируются и зависят от множества факторов. Например, наличие препятствий (пней, камней, отходов лесозаготовок и др.) вызывает необходимость работы в различных скоростных и нагрузочных режимах. Повышение нагрузки на узлы и детали машин приводит к их отказам [4], а поскольку стоимость специализированной пожарной техники приближается к стоимости лесозаготовительных машин, задача исследования надёжности модульной системы пожаротушения на базе форвардера представляется достаточно актуальной.

На сегодняшний день вероятностно-статистические методы расчёта показателей надёжности с позиций механики разрушения в достаточной степени разработаны [5]. При этом предполагается, что входная статистическая информация является полной, т. е. законы распределения нагрузок, размеров, механических свойств и других характеристик известны и могут быть использованы для проведения проектных расчётов с заданной точностью. Однако зачастую бывает достаточно сложно получить полную статистическую информацию об уровне и характере действующих нагрузок. Таким образом, применение традиционных вероятностных методов при наличии неполной статистической информации может привести к неверному результату. В этом случае для решения задачи могут быть использованы методы теории возможностей [6—8]. Следует отметить, что при ограниченной информации хорошие результаты дают также теория свидетельств Демпстера — Шейфера [9], байесовский подход [10], методы интервальных средних [11]. Существующие теории и особенности их применения подробно проанализированы в фундаментальной работе Л. В. Уткина [8].

## 2. Материалы и методы

Условие сохранения работоспособного состояния по широко применяемому в механике разрушения силовому подходу Ирвина [12] имеет вид:

$$\tilde{\sigma}_1 Y(\tilde{l}) \sqrt{\pi \tilde{l}} \leq \tilde{K}_{IC}, \quad (1)$$

где  $Y(\tilde{l})$  — коэффициент, учитывающий геометрическую форму детали и длину (полудлину) трещины;  $\tilde{\sigma}_1$  — максимальное действующее напряжение растяжения;  $\tilde{l}$  — длина (полудлина) трещины;  $\tilde{K}_{IC}$  — критический коэффициент интенсивности напряжений или вязкость разрушения.

Полагаем  $Y(\tilde{l}) = Y = const$ , что справедливо для случая, когда длина трещины несоизмеримо меньше размеров детали;  $\tilde{l}$  и  $\tilde{K}_{IC}$  — случайные величины с известными законами распределения  $f_{\tilde{l}}(l)$  и  $f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC})$ ;  $\tilde{\sigma}_1$  — нечёткая переменная с функцией распределения возможностей.

$$\pi_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1) = \exp\left\{-\left[\frac{(\sigma_1 - a_{\sigma})}{b_{\sigma}}\right]^2\right\}, \quad (2)$$

где  $a_{\sigma} = 0.5 \cdot (\sigma_{1\max} + \sigma_{1\min})$ ;  $b_{\sigma} = \frac{0.5 \cdot (\sigma_{1\max} - \sigma_{1\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}$ ,  $\alpha \in [0,1]$ .

Параметры  $\sigma_{1\max}$  и  $\sigma_{1\min}$  определяются из экспериментально полученных в ходе эксплуатации данных о процессе нагружения детали. Очевидно, что такая информация носит ограниченный характер, и поэтому переменная  $\tilde{\sigma}_I$  рассматривается как нечёткая.

В теории возможностей пара распределений (верхняя и нижняя функции распределения вероятностей) иногда называется р-блоком (p-box) [8]. «Точное» распределение  $F_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)$  находится внутри блока [7]:

$$\underline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1) \leq F_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1) \leq \overline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1), \quad (3)$$

где  $\underline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)$  и  $\overline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)$  — соответственно нижняя и верхняя функции распределения вероятностей.

Функция распределения возможностей связана с р-блоком следующими соотношениями:

$$\underline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1) = \begin{cases} 0, & \sigma_1 \leq a_{\sigma} \\ 1 - \pi_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1), & \sigma_1 > a_{\sigma} \end{cases} \\ \overline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1) = \begin{cases} \pi_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1), & \sigma_1 \leq a_{\sigma} \\ 1, & \sigma_1 > a_{\sigma} \end{cases}. \quad (4)$$

Необходимо оценить вероятность возникновения отказа  $Q = \{ Y\sigma_1\sqrt{\pi l} > K_{IC} \}$ , при описании  $\tilde{\sigma}_I$  посредством теории возможностей, а  $\tilde{l}$  и  $\tilde{K}_{IC}$  — методами теории вероятностей. В нашем случае для  $\tilde{\sigma}_I$  — нечёткой, а  $\tilde{l}$  и  $\tilde{K}_{IC}$  — случайных, искомая вероятность запишется:

$$P\{Y\sigma_1\sqrt{\pi l} > \tilde{K}_{IC}\} = \iiint_{Y\sigma_1\sqrt{\pi l} > K_{IC}} f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) f_{\tilde{l}}(l) f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC}) d\sigma_1 dl dK_{IC}, \quad (5)$$

где  $f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1)$ ,  $f_{\tilde{l}}(l)$ ,  $f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC})$  — плотности распределения соответствующих случайных величин  $\tilde{\sigma}_1$ ,  $\tilde{l}$  и  $\tilde{K}_{IC}$ .

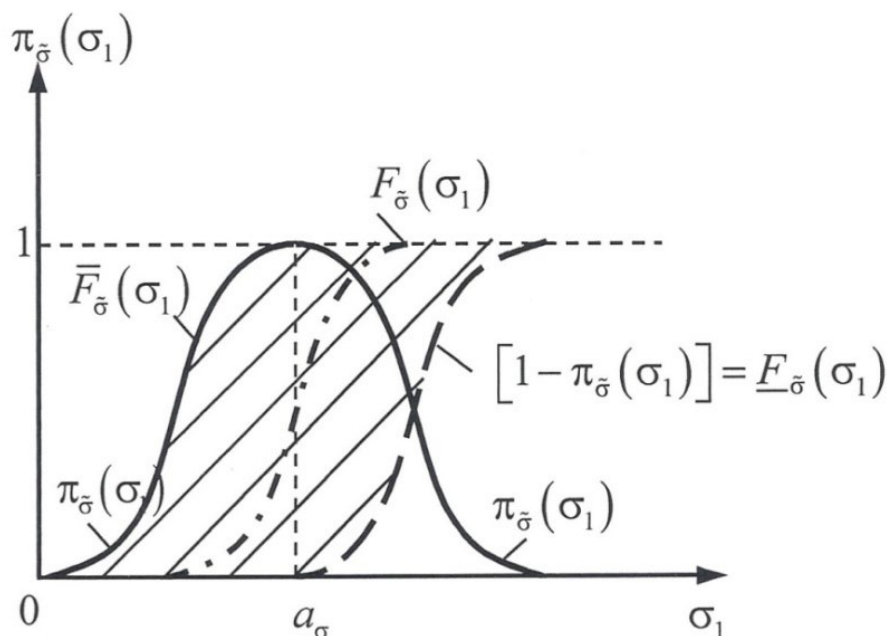
Подставив пределы интегрирования, получим следующее выражение:

$$P\{Y\sigma_1\sqrt{\pi l} > \tilde{K}_{IC}\} = \int_0^{\infty} \int_0^{Y\sigma_1\sqrt{\pi l}} \int_0^{\infty} f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) f_{\tilde{l}}(l) f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC}) d\sigma_1 dl dK_{IC} = \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) f_{\tilde{l}}(l) \left[ \int_0^{Y\sigma_1\sqrt{\pi l}} f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC}) dK_{IC} \right] d\sigma_1 dl = \\
 &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) f_{\tilde{l}}(l) \cdot F_{\tilde{K}_{IC}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) d\sigma_1 dl,
 \end{aligned}$$

где  $F_{\tilde{K}_{IC}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) = \int_0^{Y\sigma_1\sqrt{\pi l}} f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC}) dK_{IC}$  — функция распределения вероятностей случайной величины  $K_{IC}$ .

Полагаем, что  $\tilde{\sigma}_1$ ,  $\tilde{l}$  и  $\tilde{K}_{IC}$  являются независимыми. Нижнее и верхнее значения вероятности отказа с позиций механики разрушения определяются с использованием зависимостей (4) и пределов интегрирования (рисунок 1) по формулам



**Рисунок 1.** Верхняя и нижняя функции распределения вероятностей

**Figure 1.** Upper and lower probability distribution functions

$$\left. \begin{aligned}
 \underline{Q} &= \int_{a_\sigma}^{\infty} \int_0^{\infty} f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) [f_{\tilde{l}}(l) \cdot F_{\tilde{K}_{IC}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) dl] d\sigma_1 \\
 \bar{Q} &= \int_0^{a_\sigma} \int_0^{\infty} \bar{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) [f_{\tilde{l}}(l) \cdot F_{\tilde{K}_{IC}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) dl] d\sigma_1
 \end{aligned} \right\}$$



или

$$\left. \begin{aligned} \underline{Q} &= \int_{a_\sigma}^{\infty} \underline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) \left[ \int_0^{\infty} f_{\tilde{l}}(l) \cdot F_{\tilde{K}_{1c}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) dl \right] d\sigma_1 \\ \overline{Q} &= \int_0^{a_\sigma} \overline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) \left[ \int_0^{\infty} f_{\tilde{l}}(l) \cdot F_{\tilde{K}_{1c}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) dl \right] d\sigma_1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь  $\underline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = \frac{dF_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1)}{d\sigma_1}$ ,  $\overline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = \frac{d\overline{F}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1)}{d\sigma_1}$  — нижняя и верхняя плотности распределения;  $F_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1)$ ,  $\overline{F}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1)$  — нижняя и верхняя функции распределения,

$$\underline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = \frac{d(1 - \pi_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1))}{d\sigma_1} = 2 \frac{\sigma_1 - a_\sigma}{b_\sigma} \cdot \frac{1}{b_\sigma} e^{-\left(\frac{\sigma_1 - a_\sigma}{b_\sigma}\right)^2}, \quad (8)$$

$$\overline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = \frac{d\pi_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1)}{d\sigma_1} = -2 \left(\frac{\sigma_1 - a_\sigma}{b_\sigma}\right) \cdot e^{-\left(\frac{\sigma_1 - a_\sigma}{b_\sigma}\right)^2}, \quad (9)$$

$$\underline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = 0, \text{ если } \sigma_1 < a_\sigma, \text{ и } \overline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = 0, \text{ если } \sigma_1 > a_\sigma. \quad (10)$$

Законы распределения  $\tilde{l}$  и  $\tilde{K}_{1c}$  полагаем гауссовскими с известными математическими ожиданиями  $m_l, m_{K_{1c}}$  и дисперсиями  $S_l^2, S_{K_{1c}}^2$ , плотность распределения длины трещины

$$f_{\tilde{l}}(l) = \frac{1}{S_l \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l - m_l)^2}{2S_l^2}}, \quad (11)$$

функция распределения вязкости разрушения

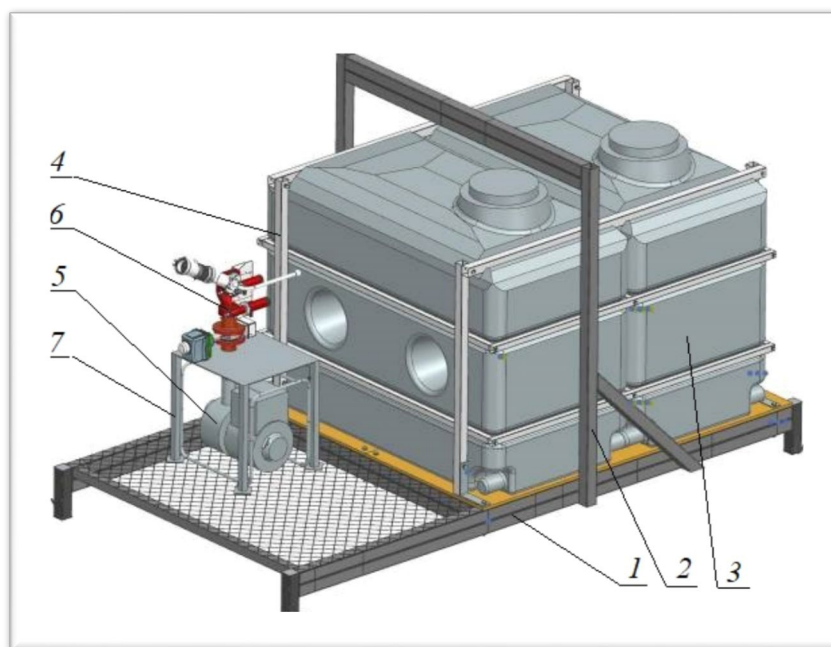
$$F_{\tilde{K}_{1c}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) = \int_0^{Y\sigma_1\sqrt{\pi l}} \frac{1}{S_{K_{1c}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K_{1c} - m_{K_{1c}})^2}{2S_{K_{1c}}^2}} dK_{1c}. \quad (12)$$

Оценка интервала вероятности отказа  $[\underline{Q}, \overline{Q}]$  осуществляется по формулам (7) с учётом выражений (8)—(12). Нижнее  $\underline{R}$  и верхнее  $\overline{R}$  значения вероятности безотказной работы определяются:  $\underline{R} = 1 - \overline{Q}$  и  $\overline{R} = 1 - \underline{Q}$ . Реальное значение вероятности безотказной работы находится внутри интервала  $[\underline{R}, \overline{R}]$ .

### 3. Результаты

Проведём оценку вероятности безотказной работы конструкции несущей рамы (платформы) модульной системы пожаротушения на базе форвардера Амкодор-2661.

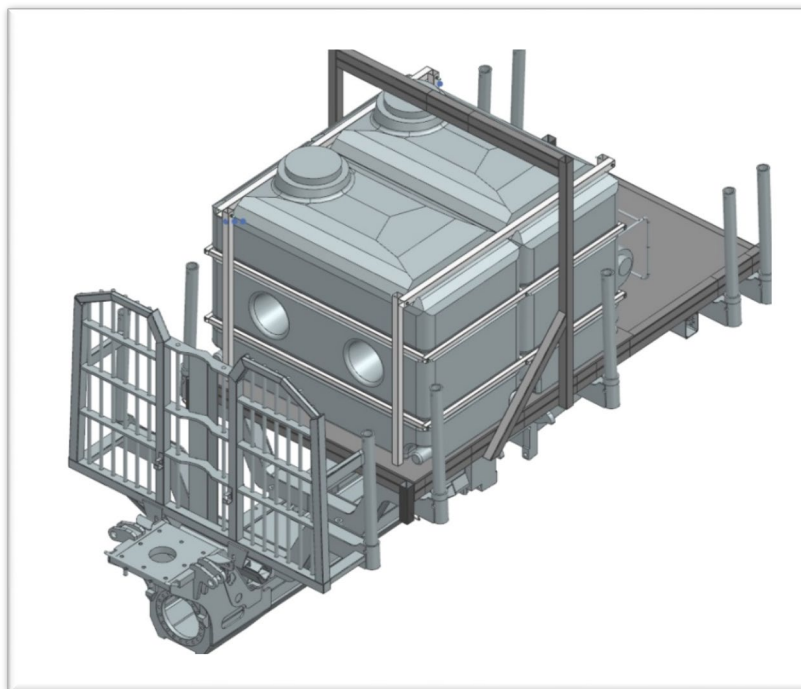
Компоновочная схема установки для пожаротушения представлена на рисунках 2, 3. Все комплектующие мобильного комплекса (мотопомпа «Гейзер» МП 10/70, лафетный ствол ЛСД-С20У, ёмкости для огнетушащей жидкости МП3000ФК2\_1П100 объёмом 3150 л каждая) размещены на несущей раме — платформе 1.



**Рисунок 2.** Компоновочная схема модульной системы пожаротушения (вариант с двумя ёмкостями для огнетушащего вещества)

**Figure 2.** Layout diagram of a modular fire extinguishing system (option with two containers for a fire extinguishing agent)

Платформа 1 представляет собой сварную конструкцию из стандартного профиля стальной трубы квадратного сечения и листовых материалов. Для осуществления погрузки мобильного комплекса гидроманипулятором в грузовой отсек форвардера платформа 1 оснащена верхней балкой 2, которая также служит в качестве опоры гидроманипулятора форвардера после погрузки мобильного комплекса в грузовой отсек. Ёмкости для огнетушащего вещества 3 размещены на передней части платформы 1 и зафиксированы на ней при помощи обвязки 4, составленной из труб стального профиля квадратного сечения. В задней части платформы 1 размещены мотопомпа 5, гидравлически связанная с лафетным стволом 6 и ёмкостями 3 при помощи трубопроводной арматуры (на схеме не показана). Лафетный ствол 6 с системой управления размещён над мотопомпой 5 на опоре 7, установленной на перфорированном листе несущей рамы и представляющей сварную конструкцию из стандартного профиля стальной трубы квадратного сечения и листовых материалов.



**Рисунок 3.** Компоновочная схема установки, размещённой в грузовом отсеке форвардера

**Figure 3.** Layout diagram of a modular system loaded into the forwarder's cargo compartment

При проектировании установки силовой расчёт платформы проводился для следующих вариантов нагружения:

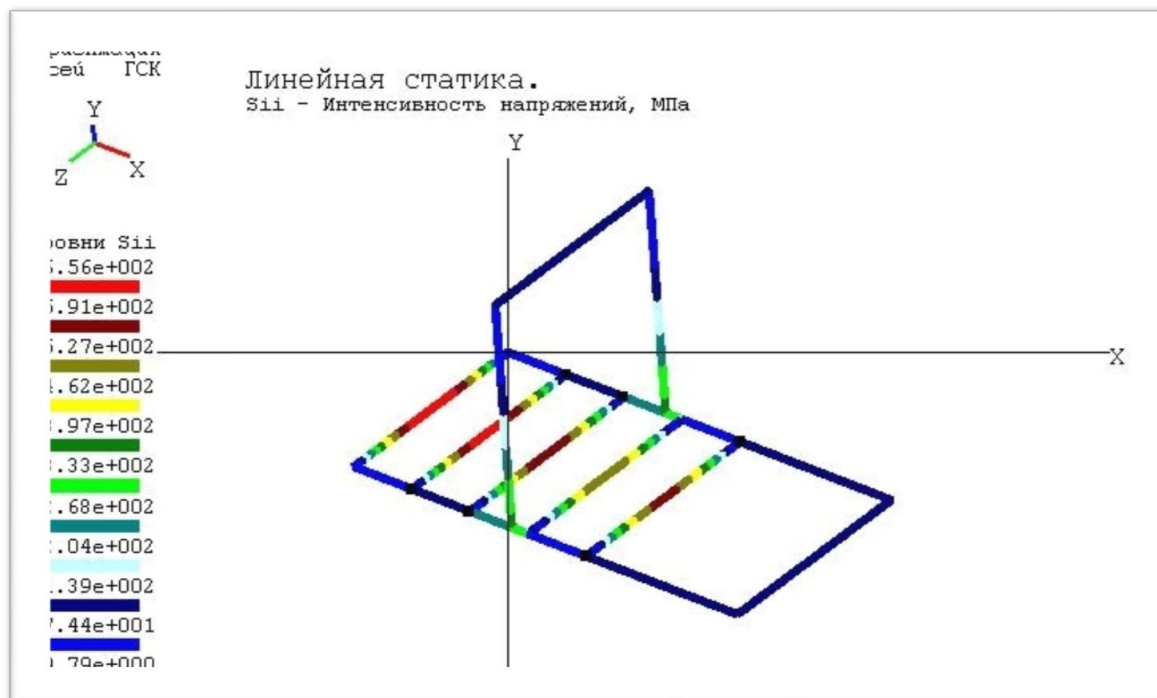
- вариант погрузки установки для пожаротушения с незаполненными ёмкостями в грузовой отсек гидроманипулятором;
- вариант размещения установки с заполненными ёмкостями в грузовом отсеке форвардера. Ниже представим результаты расчёта по второму — наиболее нагруженному — варианту.

Для проведения силового расчёта в пакете прикладных программ «Зенит» была построена КЭ-модель платформы. Платформа представлена в виде стержневой конструкции, состоящей из полых труб квадратного сечения. Величина нагрузки, действующей на платформу со стороны ёмкостей для огнетушащего вещества, принята равной  $G = 63$  кН и равномерно распределённой между узлами модели, соответствующими зоне расположения ёмкостей.

КЭ-модель платформы с интенсивностью действующих напряжений для варианта сечения стержней  $40 \times 40 \times 2$  мм представлена на рисунке 4. При нагружении по данному варианту наибольшие напряжения действуют в поперечных балках, лежащих в передней части платформы, величина их составляет 656 МПа. Таким образом, параметры функции распределения возможностей принимаем:  $a_\sigma = 656$  МПа,  $b_\sigma = 65,6$  МПа [8].

Материал платформы — сталь 15ХСНД с вязкостью разрушения  $K_{IC} = 1310 \text{ Н/мм}^{3/2}$  [13]. Принимаем математическое ожидание вязкости разрушения  $m_{K_{IC}} = 1310 \text{ Н/мм}^{3/2}$  и среднее квадратическое отклонение (с. к. о.)  $S_{K_{IC}} = 0,1 m_{K_{IC}}$  [14].

В качестве трещиноподобного дефекта принимаем краевую трещину с математическим ожиданием  $m_l = 0,5 \text{ мм}$  и средним квадратическим отклонением (с. к. о.)  $S_l = 0,1 m_l$  [14].



**Рисунок 4.** КЭ-модель платформы с интенсивностью действующих напряжений (вариант с заполнением ёмкостей огнетушащим веществом)

**Figure 4.** Finite-element model of platform with calculated stress intensity (containers are filled with a fire extinguishing agent)

Оценку вероятности безотказной работы платформы при наличии в её материале трещиноподобных дефектов проведём при помощи программы, реализованной в среде MathCAD и представленной на рисунке 5.

По результатам расчётов, значение вероятности безотказной работы находится в интервале  $[0,981; 0,999]$ . Следует отметить, что на практике важно знать наибольшее значение вероятности отказа и, соответственно, наименьшую — наиболее обеспеченную — вероятность безотказной работы конструкции.

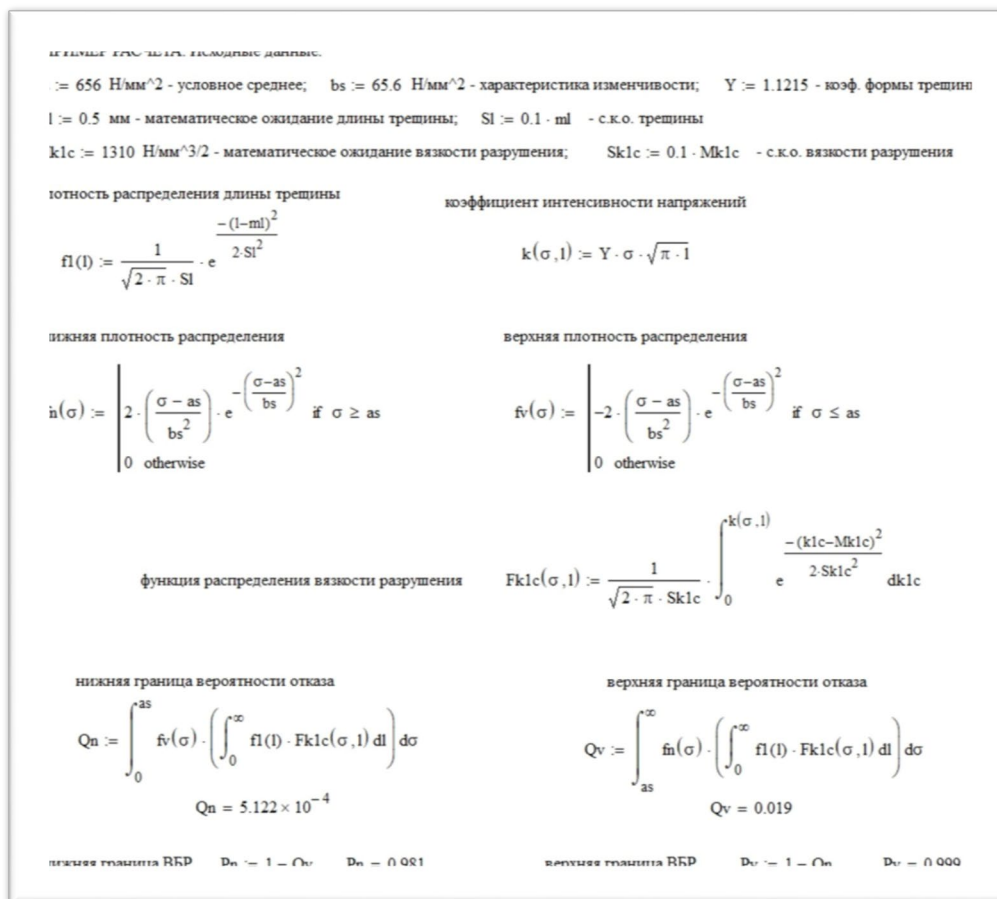


Рисунок 5. Пример расчёта вероятности безотказной работы в программе MathCAD

Figure 5. The example of reliability function estimation in MathCAD program

#### 4. Обсуждение и заключение

Совершенствование вероятностно-статистических методов механики разрушения, позволяющих произвести учёт влияния трещиноподобных дефектов на уровень надёжности деталей машин и элементов конструкций, является актуальной задачей. В то же время в ряде случаев нет достаточного количества статистической информации, т. е. имеет место неполнота информации, что определяет направление дальнейших исследований.

Разработан метод оценки вероятности безотказной работы деталей машин и элементов конструкций при воздействии предельной нагрузки с использованием силовых критериев механики разрушения при случайных и нечётких параметрах. В качестве нечёткой переменной, описываемой функцией распределения возможностей, рекомендовано рассматривать действующее напряжение. Размер трещины и вязкость разрушения рассматривались как случайные величины с известными законами распределения. Приведён пример расчёта вероятности безотказной работы элементов конструкции платформы, входящей в состав модульной системы пожаротушения на базе форвардера.

## Благодарности

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках проекта «Разработка мобильного комплекса на базе форвардера для тушения лесных пожаров», поддержанного в рамках Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц, имеющих учёную степень, обеспечивающих значительный вклад в инновационное развитие отраслей экономики и социальной сферы Республики Карелия, в 2023 году, финансируемой Правительством Республики Карелия (договор № 3-Г22 от 29.12.2022 между ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» и Фондом венчурных инвестиций Республики Карелия).

## Список литературы

1. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2021 году / Под ред. А. Н. Громцева. Петрозаводск, 2022. 263 с.
2. Газизов А. М., Янгирова Р. Р. Современные методы борьбы с лесными пожарами // Нефтегазовое дело. 2021. № 1. С. 25—39.
3. Вычерова Н. Р., Будевич Е. А., Беляев А. Э. Разработка системы раннего обнаружения лесных пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов и искусственного интеллекта // Resources and Technology. 2022. № 19 (4). С. 85—101.
4. Skobtsov I. G., Shilovsky V. N., Dobrynina O. L. Estimating the reliability of forestry machine elements with possibility theory application // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 954. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/954/1/012071>. Text. Image: electronic.
5. Pitukhin A. V. Optimal design problems using fracture mechanics methods // Computers and Structures. 1997. Vol. 65 (4). P. 621—624.
6. Dubois D., Prade H. Possibility theory: an approach to computerized processing of uncertainty. New York: Plenum Press, 1988. 288 p.
7. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. P. 338—353.
8. Уткин Л. В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации. СПб.: Наука, 2007. 404 с.
9. Dempster A. P. Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping // Annales of Mathematical Statistics. 1967. Vol. 38 (2). P. 325—339.
10. Berger J. O. Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis. New York: Springer-Verlag, 1985. 617 p.
11. Tonnon F., Bernardini A., Mammino A. Reliability analysis of rock mass response by means of random set theory // Reliability Engineering and System Safety. 2000. Vol. 70 (3). P. 263—282.
12. Irwin G. R. Fracture dynamics // Fracturing of metals. 1948. ASM publ. P. 147—166.
13. Саврук М. П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами: Справ. пособие // Механика разрушения и прочность материалов: В 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. Киев: Наукова думка, 1988. Т. 2. 620 с.
14. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчёты деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 480 с.

## References

1. Gromtsev A. N. *State environmental report of the Republic of Karelia in 2021*. Petrozavodsk, 2022. 263 p. (In Russ.)
2. Gazizov A. M., Yangirova R. R. Modern methods of fighting forest fires. *Oil and gas business*, 2021, no. 1, pp. 25—39. (In Russ.)
3. Vycherova N. R., Budevich E. A., Belyaev A. E. Development of a forest fire early detection system using unmanned aerial vehicles and artificial intelligence. *Resources and Technology*, 2022, no. 19 (4), pp. 85—101. (In Russ.)
4. Skobtsov I. G., Shilovsky V. N., Dobrynina O. L. Estimating the reliability of forestry machine elements with possibility theory application. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 954. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/954/1/012071>. Text. Image: electronic.
5. Pitukhin A. V. Optimal design problems using fracture mechanics methods. *Computers and Structures*, 1997, vol. 65 (4), pp. 621—624.
6. Dubois D., Prade H. *Possibility theory: an approach to computerized processing of uncertainty*. New York, Plenum Press, 1988. 288 p.
7. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, pp. 338—353.
8. Utkin L. V. *Analysis and Decision Making with Incomplete Information*. Saint-Petersburg, Nauka, 2007. 404 p. (In Russ.)
9. Dempster A. P. Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping. *Annales of Mathematical Statistics*, 1967, vol. 38 (2), pp. 325—339.
10. Berger J. O. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. New York, Springer-Verlag, 1985. 617 p.
11. Tonnon F., Bernardini A., Mammino A. Reliability analysis of rock mass response by means of random set theory. *Reliability Engineering and System Safety*, 2000, vol. 70 (3), pp. 263—282.
12. Irwin G. R. Fracture dynamics. *Fracturing of metals*, 1948, ASM publ, pp. 147—166.
13. Savruk M. P. Stress Intensity Factors in Solids with Cracks. *Fracture Mechanics and Strength of Materials: Resource book in 4 volumes*. By V. V. Panasyuk edition. Kiev, Naukova dumka, 1988, vol. 2. 620 p. (In Russ.)
14. Serensen S. V., Kogaev V. P., Shneyderovich R. M. *Load-carrying capacity and machine element strength analysis*. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 480 p. (In Russ.)