

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

Materials mechanics: strength, durability, safety

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-1-50-57>

ВОЗМОЖНОСТИ ВЕРОЯТНОСТНОГО РИСК-АНАЛИЗА ПОВРЕЖДАЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАММА-МОДЕЛИ

© Анатолий Михайлович Лепихин^{1,2*}, Николай Андреевич Махутов³,
Виктор Викторович Лещенко¹

¹ Научно-технический центр «Нефтегаздиагностика», Россия, 105066, Москва, Нижняя Красносельская ул., д. 40/12, к. 46; *e-mail: aml@ict.nsc.ru

² Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика М. А. Лаврентьева, д. 6; e-mail: aml@ict.nsc.ru

³ Институт машиноведения РАН, Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4; e-mail: kei51@mail.ru

*Статья поступила 5 июня 2023 г. Поступила после доработки 5 июня 2023 г.
Принята к публикации 28 июля 2023 г.*

Предлагается методика вероятностного риск-анализа технических объектов с накапливаемыми необратимыми повреждениями. Повреждения рассматриваются как стохастический необратимый кумулятивный процесс с поглощающей границей. В качестве модели накопления повреждений используется гамма-процесс с зависящей от времени плотностью распределения вероятностей. Функция распределения ресурса до разрушения и вероятность (риск) разрушения определяются интегрированием плотности вероятностей накопленных повреждений по области риска. Скорость накопления повреждений рассматривается как нестационарная функция времени. Параметры функции распределения накопленных повреждений могут быть определены по данным неразрушающего контроля методом максимума правдоподобия или методом моментов. Особенность и возможности предлагаемой методики показаны на примере риск-анализа коррозионных повреждений критически важных технических объектов — морских промысловых трубопроводов. Представлены результаты расчетов вероятностей разрушения трубопроводов при вариациях параметра формы и параметра масштаба функции распределения повреждений. Установлено, что основное влияние на вероятность разрушения оказывает параметр формы, непосредственно зависящий от времени накопления повреждений. Основное отличие предлагаемой методики от других схем и методик риск-анализа повреждений заключается в том, что параметры гамма-модели явно зависят от времени, что позволяет прогнозировать вероятность разрушения для заданного интервала эксплуатации технических объектов. Предложенная методика может быть адаптирована для других видов повреждений, в частности для процессов длительных повреждений с ростом коррозионных, коррозионно-усталостных и усталостных трещин.

Ключевые слова: технический объект; накопление повреждений; гамма-процесс; риск-анализ; вероятность разрушения; трубопровод; язвенная коррозия.

POTENTIALITY OF PROBABILISTIC RISK ANALYSIS OF DAMAGED TECHNICAL OBJECTS USING THE GAMMA MODEL

© Anatoly M. Lepikhin,^{1,2*} Nikolay A. Makhutov,³ Viktor V. Leschenko¹

¹ NTC NefteGazDagnostika, 40/12, k. 4b, Nizhnyaya Krasnoselskaya ul., Moscow, 105066, Russia; e-mail: aml@ict.nsc.ru

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 6, Akad. M. A. Lavrentieva prosp., Novosibirsk, 630090, Russia; e-mail: aml@ict.nsc.ru

³ Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, Maly Kharitonyevsky Per., Moscow, 101990, Russia; e-mail: kei51@mail.ru

Received June 5, 2023. Revised June 5, 2023. Accepted July 28, 2023.

A technique for probabilistic risk analysis of technical objects with accumulated irreversible damage is proposed. Damage is considered as a stochastic irreversible cumulative process with an absorbing bound-

ary. The gamma process is used as a model of damage accumulation with a time-dependent probability density distribution. The probability distribution function of life before failure and the probability (risk) of failure are determined by integrating the probability density of accumulated damage over the risk area. The damage accumulation rate is considered as a non-stationary function of time. The parameters of damage distribution function can be determined from the data of non-destructive testing using the maximum likelihood method or the method of moments. The potentiality and features of the proposed method are exemplified in the risk analysis of the corrosion damage of critically important technical objects, e.g., offshore pipelines. The results of calculating the pipeline failure probability at various shape parameters and the scale parameter of the damage distribution function are presented. It is shown that the shape parameter which directly depends on the time of damage accumulation most strongly affects the damage probability. The main difference between the proposed methodology and other schemes and methods of damage risk analysis is the explicit time dependence of the gamma model parameters, which makes it possible to predict the probability of failure for a given service interval of technical objects. The proposed technique can be adapted for other types of damage, in particular for processes of long-term damage with the growth of corrosion, corrosion-fatigue and fatigue cracks.

Keywords: technical object; damage accumulation; gamma process; risk analysis; failure probability; pipeline; pitting corrosion.

Введение

Статистический анализ разрушений технических объектов показывает, что они, как правило, обусловлены комплексом причин и факторов, основными из которых являются конструктивно-технологические дефекты и эксплуатационные повреждения. В связи с этим исследованию влияния дефектов и повреждений на прочность, надежность и безопасность конструкций технических объектов уделяется большое внимание [1, 2]. Одним из важных направлений этих исследований является вероятностный анализ с позиций концепции риска аварий, определяемый как риск-анализ [1, 3]. Риск-анализ — важная составная часть риск-ориентированного подхода, принятого в Стратегии национальной безопасности (утверждена Указом Президента РФ от 2021 г., № 400) и Федеральном законе 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

В основной массе публикаций риск-анализ основан на статических моделях теории надежности, анализирующих вероятности отказов в фиксированные моменты времени [4, 5]. Кинетические модели теории надежности используются намного реже [6]. Риск-анализ конструкций с учетом кинетических аспектов статистических ансамблей дефектов и повреждений рассматривается крайне редко. В данной статье обсуждаются возможности такого риск-анализа с использованием кинетических моделей на основе стохастических гамма-процессов. Под риск-анализом понимается определение вероятностей разрушений несущих конструкций технических объектов при зависящих от времени статистических ансамблях дефектов и повреждений. При этом указанная зависимость от времени определяется необратимыми кумулятивными повреждениями в течение заданного отрезка времени или заданного срока эксплуатации конструкции.

Кумулятивные повреждения конструкций вызывают обширный ряд процессов — коррозионных, эрозионных, усталостных, сопровождаемых ползучестью, ростом трещин и др. Интенсивность и последовательность кумулятивных повреждений зависит от истории нагружения, деградации свойств конструкционных материалов, условий окружающей среды и ряда других эксплуатационных факторов. В любой момент времени кумулятивные повреждения имеют статистический разброс, обусловленный различным начальным уровнем повреждений, вариациями интенсивности и последовательности повреждающих воздействий, неоднородностью структуры и механических свойств металла, стратегией технического обслуживания и ремонтов конструкций. В строгом представлении кумулятивные повреждения являются процессами с поглощающей границей, определяемой видом и критерием предельного состояния несущих конструкций. В данной статье рассматриваются возможности риск-анализа с использованием гамма-модели накопления повреждений, впервые предложенной в работе [7].

Формулировка функции риска

В контексте задачи риск-анализа будем полагать, что в любой заданный момент времени t несущие конструкции технических объектов содержат статистические ансамбли конструктивно-технологических и эксплуатационных макродефектов сплошности металла $D(t) = \{d_{ij}(t), i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m\}$, где n — число видов, а m — число типов дефектов. Каждый дефект характеризуется пространственным положением в конструкции и геометрическими размерами $d_{ij} = \{l_x, l_y, l_z\}$. Все виды и типы дефектов условно разделим на две группы: объемные, для которых характеристические размеры соотносятся как

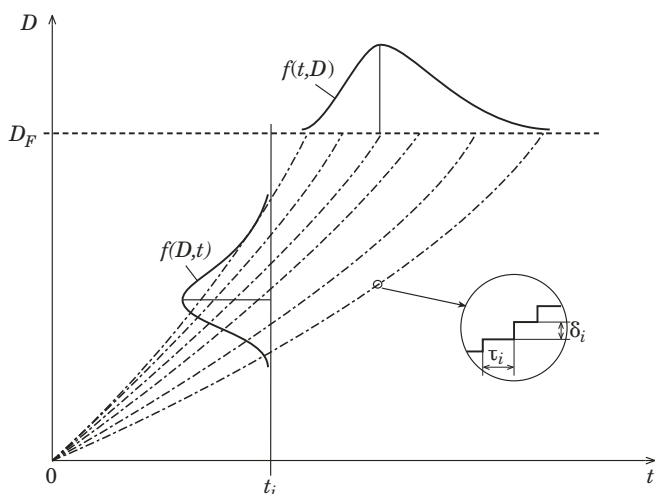


Рис. 1. Схема накопления повреждений

Fig. 1. Scheme of damage accumulation

$l_x \approx l_y \approx l_z$ и плоские (трещиноподобные), для которых $l_x > l_y > l_z$. Такое разделение связано с различием критериев опасности дефектов в зависимости от их формы.

Для всех видов и типов дефектов можно задать условие необратимости $\delta_i = D_i - D_{i-1} \geq 0$ и кинетические условия $\partial D / \partial t = \varphi\{D(t), X(t)\}$, где $X(t)$ — случайные переменные, характеризующие нагрузки, воздействия, характеристики механических свойств и геометрические размеры конструкции. Кинетические условия определяют особенности процесса накопления повреждений в виде развития дефектов. Накопление повреждений происходит до момента достижения предельного состояния конструкции $G\{t: C(D), X\}$, зависящего от критерия предельного состояния, включающего оценку опасности дефекта $C(D)$. Критерий опасности $C(D)$ определяет величину предельного размера дефекта D_F , который можно рассматривать как поглощающую границу процесса $D(t)$. Поглощающей границей является в том смысле, что, достигнув ее, дефекты не могут возвратиться в предыдущее состояние. С учетом изложенного развитие дефектов можно представить как кумулятивный процесс накопления повреждений $D(t)$ с поглощающей границей D_F (рис. 1). В общем случае рост повреждений можно рассматривать как дискретно-непрерывный процесс со случайными неотрицательными приращениями δ_i на случайных интервалах времени $\tau_i = t_i - t_{i-1}$. При этом накопленное за время t повреждение является случайной суммой приращений — $D(t) = \sum_{i=1}^n \delta_i$.

На основании статистического анализа можно полагать, что объемные и плоские дефекты

различных видов и типов (поры, шлаковые включения, раковины, трещины, расслоения, поверхностные, внутренние и др.) в конструкциях являются статистическими ансамблями и могут быть представлены распределениями плотностей вероятностей двух видов: $f_V(k)$ — числа k дефектов в заданном объеме V и $f_V(l)$ — размеров дефектов [3]. С позиций статистики размещений полагаем, что функция $f_V(k)$ может иметь биномиальный или пуассоновский вид:

$$f_V(k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}, \quad (1)$$

$$f_V(k) = \frac{\mu^k}{k!} e^{-\mu}, \quad (2)$$

где n — общее число дефектов; μ — математическое ожидание числа дефектов; p, q — вероятности наличия и отсутствия дефекта.

Функции плотностей распределений размеров дефектов $f_V(l)$ теоретически должны иметь экспоненциальный вид, поскольку с понижением размерного масштаба (макро-, мезо-, микро-) число дефектов возрастает. Однако, ограничиваясь макромасштабом и принимая во внимание конечную разрешающую способность методов неразрушающего контроля, наиболее подходящим видом распределений размеров дефектов можно полагать гамма-распределение или распределение Вейбулла:

$$f_V(l) = \frac{\lambda(\lambda l)^{\eta-1}}{\Gamma(\eta)} e^{-\lambda l}, \quad (3)$$

$$f_V(l) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{l}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{l}{\theta}\right)^\beta\right], \quad (4)$$

где $\lambda, \eta, \beta, \theta$ — статистические параметры.

Как отмечено выше, развитие макродефектов сплошности металла происходит вследствие случайных процессов накопления повреждений. С учетом этого накопление повреждений $D(t)$ в каждый момент времени t_i можно характеризовать плотностью распределения вероятностей $f(D, t)$ (см. рис. 1). Распределение моментов времени t_F достижения поглощающей границы D_F будет определять плотность распределения вероятностей ресурса до разрушения $f(t, D)$.

Перераспределение плотностей $f(D, t)$ во времени приводит к изменению вероятностей разрушения $P_F(D, t)$ (рис. 2), которые можно опреде-

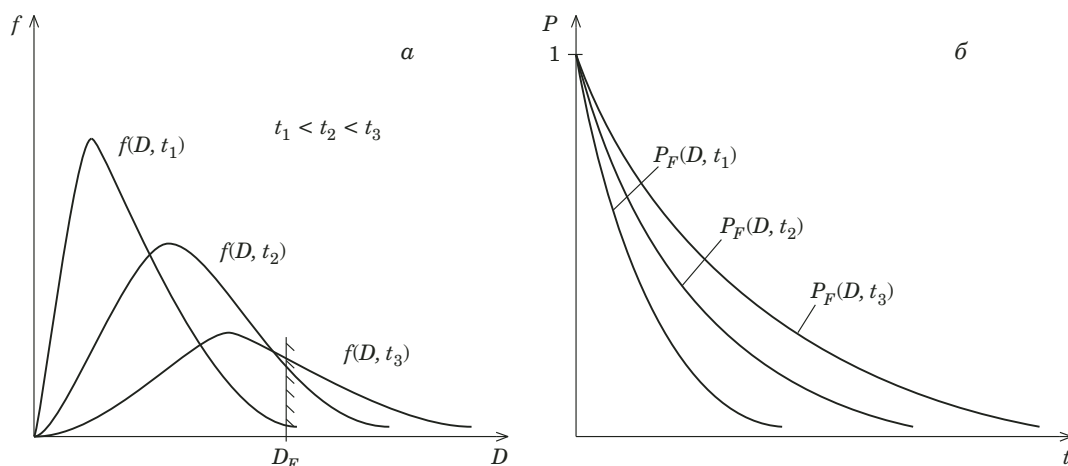


Рис. 2. Схемы изменения плотностей вероятностей повреждений (а) и вероятностей разрушения (б) во времени

Fig. 2. Scheme of changes in the damage probability density functions (a) and the failure probability functions (b) in time

лить интегрированием функции $f(D, t)$ по области риска, определяемой границей D_F :

$$P_F(D, t) = \int_{D_F}^{\infty} f(D, t) dD. \quad (5)$$

Ресурс T до разрушения соответствует моменту первого достижения процессом $D(t)$ поглощающей границы D_F :

$$T = \inf\{t: D(t) \geq D_F\}. \quad (6)$$

Функцию вероятностей распределения ресурса $F(t)$ запишем как

$$F(t) = P\{t: D(t) < D_F\} = \int_0^{D_F} f(D, t) dt. \quad (7)$$

Гамма-модель накопления коррозионных повреждений

Для определения вероятностей (5) и (7) необходимо задать вид функции $f(D, t)$. Обычно такие функции получают методами многократного статистического моделирования роста начальных дефектов со случайными скоростями [3]. Альтернативный метод заключается в трансформации функции $f(D, t)$ во времени с одинаковой для всех дефектов скоростью роста. Наиболее подходящей математической моделью такого типа является гамма-процесс [7, 8]. Модель гамма-процесса качественно отличается от модели случайной скорости тем, что рост дефектов моделируется как сумма последовательности небольших независимых случайных повреждений и, таким образом, скорость непрерывно изменяется во времени. При этом, в отличие от модели со случайной ско-

ростью, рост дефектов следует одному и тому же случайному распределению, независимо от текущих размеров дефектов.

Гамма-процесс повреждений представляет собой непрерывный случайный процесс с независимыми приращениями и функцией плотности вероятностей скорости приращений [9]:

$$f(v) = Ga(v|\eta, \theta) = \frac{v^{\eta-1}}{\Gamma(\eta)\delta^\eta} \exp(-v/\theta), \quad (8)$$

где $\eta > 0$, $\theta > 0$ — параметры формы и масштаба; $\Gamma(x)$ — гамма-функция. Причем это процесс обладает свойствами масштабирования и воспроизводимости по параметру: если случайные величины подчиняются гамма-распределению, то их сумма также является гамма-распределением с тем же параметром масштаба и параметром формы α , равным сумме параметров формы — $\alpha = \sum \eta_i$. Эти важные свойства позволяют осуществить переход от гамма-распределения приращений размеров дефектов к гамма-распределению величины накопленных повреждений.

Как отмечено выше, скорость процессов накопления повреждений может меняться во времени. Нестационарность скорости в гамма-модели обычно учитывается заданием параметра формы α в виде степенной функции времени [9]:

$$\alpha(t) = ct^q, \quad c > 0, \quad q > 0, \quad (9)$$

где параметр c определяет эффективную среднюю скорость (изменение тренда) повреждений. Принимая во внимание свойство воспроизводимости по параметру, методом вероятностной трансформации можно показать, что распределе-

ние плотности вероятностей поврежденности также будет иметь вид гамма-функции [8, 10]:

$$f(D, t) = Ga(D, t | \alpha, \beta) = \frac{D^{ct^q-1}}{\Gamma(ct^q)\beta^{ct^q}} \exp(-\beta D). \quad (10)$$

Для оценки параметров распределения (10) можно использовать метод максимума правдоподобия для статистических данных по величинам повреждений D_i в разные моменты времени t_i . Функция правдоподобия L в этом случае является произведением независимых гамма-плотностей для приращений повреждений $\delta_i = D_i - D_{i-1}$:

$$L(\delta_1, \dots, \delta_n | c, \beta) = \prod_{i=1}^n \frac{\beta^{c(t_i^q - t_{i-1}^q)}}{\Gamma[c(t_i^q - t_{i-1}^q)]} \delta_i^{c(t_i^q - t_{i-1}^q)} \exp(-\beta \delta_i). \quad (11)$$

Оценка максимума правдоподобия для параметра $\hat{\beta}$ будет следующей [10]:

$$\hat{\beta} = \frac{\hat{c} t_n^q}{D_n}, \quad (12)$$

где оценка параметра $\hat{c}$ определяется итеративно из уравнения

$$\sum_{i=1}^n (t_i^q - t_{i-1}^q) \left\{ \Psi[c(t_i^q - t_{i-1}^q)] - \log \delta_i \right\} = t_n^q \log \frac{\hat{c} t_n^q}{D_n}. \quad (13)$$

Функция Ψ — производная от логарифма гамма-функции:

$$\Psi(x) = \frac{\Gamma'(x)}{\Gamma(x)} = \frac{\partial \log \Gamma(x)}{\partial x}. \quad (14)$$

Другим методом оценки параметров гамма-распределения является метод моментов. Согласно ему оценки определяются по формулам [10]

$$\frac{\hat{c}}{\hat{\beta}} = \sum_{i=1}^n \delta_i \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^{-1} = \frac{D_n}{t_n^q} = \bar{\delta}, \quad (15)$$

$$\frac{D_n}{\hat{\beta}} \left[1 - \sum_{i=1}^n \frac{t_i^2}{\left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^{-1}} \right] = \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta} t_i)^2. \quad (16)$$

Вероятность разрушения $P_F(t)$ определим интегрированием функции (10) по области риска:

$$P_F(t) = P\{t < T\} = \int_{D_F}^{\infty} \frac{D^{ct^q-1}}{\Gamma(ct^q)\beta^{ct^q}} \exp(-\beta D) dD = 1 - \int_0^{D_F} \frac{D^{ct^q-1}}{\Gamma(ct^q)\beta^{ct^q}} \exp(-\beta D) dD. \quad (17)$$

Таким образом, решение задачи риск-анализа конструкций, содержащих стохастические ансамбли дефектов и повреждений, заключается в задании моделей дефектности по выражениям (1) – (4), формулировке расчетных вероятностных характеристик по формулам (5) – (7), определении параметров гамма-процесса по формулам (9) – (16) и вероятностей разрушения по формуле (17). Следует отметить, что в общем случае D_F может быть случайной величиной с функцией плотности распределения вероятностей $f(D_F)$ или интервалом неопределенности $[D_F, \bar{D}_F]$. В обоих случаях можно получить соответствующие выражения для функции риска на основе формулы (17).

Расчет функции риска трубопроводов с коррозионными повреждениями

Рассмотрим некоторые прикладные аспекты риск-анализа с использованием гамма-модели применительно к конструкциям морских подводных трубопроводов с коррозионными повреждениями. К коррозионным повреждениям относятся: сплошная коррозия, приводящая к уменьшению толщины стенок конструктивных элементов; язвенная коррозия, образующая локальные концентраторы напряжений; коррозионное растрескивание, создающее условия для развития хрупких и квазихрупких разрушений. Для указанных трубопроводов наиболее типична язвенная коррозия [11]. Исследованию процессов коррозионных повреждений трубопроводов посвящено множество публикаций. Вероятностные исследования развития язвенной коррозии рассмотрены в [12 – 14]. Результаты работы [12], охватывающие 50-летний срок эксплуатации трубопроводов, показывают, что параметр c модели (9) изменяется в интервале (0,35 – 0,45) мм/год при коэффициенте вариации $V_c = 0,3$, а параметр q — в пределах 1,2 – 1,4 с коэффициентом вариации $V_q = 0,2$. С учетом этого расчеты по формулам (15) и (16) дают оценки параметра $\beta = [2, 3 - 2, 7]$.

Принимая это во внимание, выполним риск-анализ язвенных коррозионных повреждений промышленного морского нефтепровода диаметром $D = 323$ мм, толщиной стенки $t = 11,0$ мм

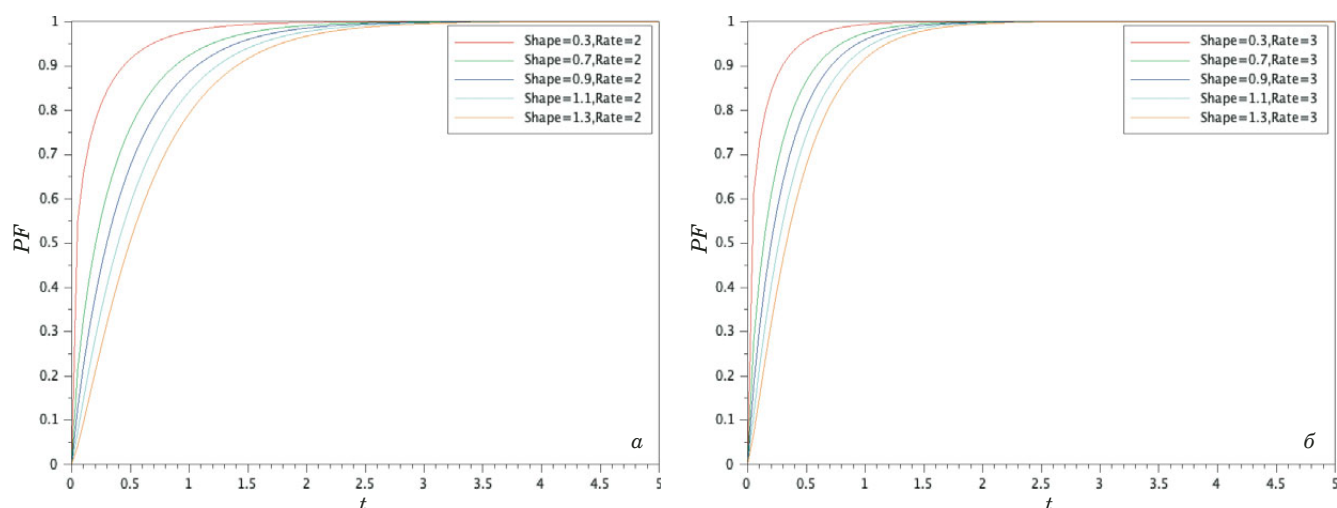


Рис. 3. Расчетные функции вероятностей разрушения трубопровода с коррозионными повреждениями (Shape = α , Rate = β)

Fig. 3. Calculated functions of the failure probability of a pipeline with a corrosion damage (Shape = α , Rate = β)

при рабочем давлении $P = 5,3$ МПа. Внутритрубная диагностика трубопровода длиной 40 км позволила выявить 1643 аномалии в виде язвенной потери металла глубиной от 1 до 4 мм. Статистический анализ показал, что плотность распределения вероятностей глубины аномалий соответствует гамма-распределению со средним значением 1,6 мм и среднеквадратическим отклонением 0,45 мм.

В качестве меры повреждений используем относительную величину $D(t) = h(t)/h_c$, где $h(t)$ — характеристический размер (глубина) дефекта, h_c — критический размер дефекта по условиям эксплуатации. С учетом этих обозначений поглощающей границей процесса накопления повреждений примем $D_F = h(t)/h_c = 1$.

Критический размер коррозионного дефекта можно определить по разным методикам, отличающимся схематизацией формы дефектов и критериальными условиями предельного состояния. В данном случае предельный размер определяли по методике [15]:

$$h_c = \frac{2t}{3} \frac{R_d - \sigma_f}{1,1R_d - \sigma_f/Q}, \quad (18)$$

$$\sigma_f = R_d RF, \quad RF = \frac{1 - \frac{2}{3} \frac{h}{t}}{1 - \frac{2}{3} \frac{h}{tQ}}, \quad Q = \sqrt{1 + 0,8 \left(\frac{l}{\sqrt{Dt}} \right)^2},$$

где R_d — расчетное сопротивление металла трубы; σ_f — критические напряжения; RF — риск-фактор дефекта; Q — поправка Фолиаса на кривизну поверхности; l — длина дефекта.

Для указанной выше статистики язвенных дефектов риск-фактор RF имеет значения в ин-

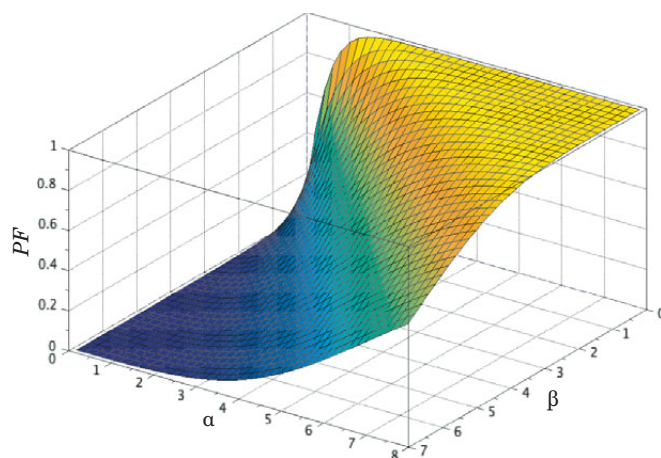


Рис. 4. Расчетная поверхность вероятностей разрушения трубопровода с коррозионными повреждениями

Fig. 4. Calculated surface of the failure probability of a pipeline with a corrosion damage

тервале от 1,007 до 1,01. С учетом этого и на основании выражения (18) получим $h_c \approx 2t/3 = 7,3$ мм. При указанном значении h_c относительная величина повреждений $D(t_k)$ на момент проведения контроля t_k находится в интервале 0,13 – 0,62, что является допустимым для эксплуатации трубопровода при заданном рабочем давлении. Однако, если принять во внимание роль случайных факторов, возникает вопрос об уровне вероятности отказов и сроке следующего проведения внутритрубной диагностики.

Для указанного трубопровода на рис. 3 представлены результаты расчетов вероятностей разрушений $P_f(t)$ с параметрами гамма-функции: $c = 0,4$, $q = [1,2, 1,4]$, $\beta = [2, 3]$ и $t = 1 - 5$ лет. Как видно, вероятности разрушений экспоненциально нарастают в интервале времени от одного

до трех лет. При этом параметр $\alpha(t)$ оказывает более существенное влияние на вероятность разрушения, чем параметр β , что вполне объяснимо его зависимостью от времени. При времени t свыше трех лет вероятности разрушения оказываются близки к единице при всех комбинациях указанных переменных. Следовательно, внутритрубная дефектоскопия должна быть проведена не позднее трехлетнего срока эксплуатации трубопровода.

На рис. 4 приведены результаты расчетов вероятностей разрушения при одновременном изменении параметров в широком диапазоне: $\alpha(t) = [0,1, 8,0]$ и $\beta = [0,4, 4,0]$. Видно, что вероятность разрушения имеет высокую чувствительность к параметру $\alpha(t)$. Увеличение параметра β в рассмотренном диапазоне приводит к незначительному снижению вероятности разрушения. Полученные результаты качественно соответствуют выводам работы [16], где также рассматривался гамма-процесс накопления повреждений с поглощающей границей.

Представленные тестовые результаты показывают, что гамма-модель не требует сложных вычислений или многократных численных реализаций и позволяет выполнять оценки вероятностей разрушения трубопроводов с коррозионными повреждениями на основе статистических данных о распределениях начальных дефектов и скорости их роста. Эти данные можно получить из результатов периодической внутритрубной диагностики. Причем функция риска в данном случае прогнозируется на любой заданный интервал времени.

Следует отметить, что гамма-модели накопления повреждений рассматриваются для моделирования роста усталостных трещин и других деградиационных процессов в конструкциях [10, 17, 18]. Представленные в этих работах обоснования, аналитические выкладки и экспериментальные оценки указывают на перспективность использования гамма-процесса в качестве вероятностной модели риск-анализа кумулятивных повреждений.

Заключение

Рассмотрены возможности риск-анализа повреждаемых конструкций с использованием гамма-модели. Особенность предлагаемой методики заключается в том, что процесс накопления повреждений представляется как кумулятивный стохастический гамма-процесс с зависящими от времени параметрами. Это позволило определить риск как непрерывную функцию времени. При этом плотность распределения повреждений определяется ее непосредственной трансформацией во времени, без статистического моделиро-

вания роста большого числа дефектов с применением метода Монте-Карло. Расчеты функции риска для трубопроводов с коррозионными повреждениями показывают, что методика может быть легко реализована при наличии данных периодического контроля накапливаемых повреждений. Использование кинетических моделей отказов на основе гамма-процесса расширяет возможности риск-анализа конструкций с необратимыми кумулятивными процессами накопления повреждений. Функции риска в этом случае учитывают время непосредственно как параметр. Предложенная методика может быть адаптирована для конструкций с другими видами повреждений, в частности для процессов роста коррозионных и усталостных трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Махутов Н. А.** Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
2. **Кузьмин Д. А.** Исследование остаточной дефектности с использованием методов теории вероятностей / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 9. С. 44 – 49. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-9-44-49
3. **Лепихин А. М., Морозов Е. М., Махутов Н. А., Лещенко В. В.** Возможности оценки вероятностей разрушения и допустимых дефектов элементов конструкций по критериям механики разрушения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 3. С. 41 – 50. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-3-41-50
4. **Haldar A., Manadewan S.** Probability, reliability and statistical methods in engineering design. — John Wiley, 2000. — 304 p.
5. **Todinov M. T.** Reliability and risk models. — John Wiley, 2005. — 322 p.
6. **Богданов Д., Козин Ф.** Вероятностные модели накопления повреждений. — М.: Мир, 1989. — 342 с.
7. **Abdel-Hameed M.** A gamma wear process / IEEE Trans. Reliab. 1975. Vol. 24. Issue 2. P. 152 – 153.
8. **Younsi K., Chebouba A., Zemmour N., Smati A.** Pipeline Integrity Assessment Using Probabilistic Transformation Method and Corrosion Growth Modeling Through Gamma Distribution / Oil and Gas Facilities. 2013. April. P. 51 – 60.
9. **Noortwijk J. M., Pandey M. D.** A stochastic deterioration process for time-depend reliability analysis. In.: Proceeding of the eleventh IFIP WG 7.5 working conference on reliability and optimization of structural systems. 2 – 5 November 2003, Banff, Canada. P. 259 – 265.
10. Numerical methods for reliability and safety assessment. Multiscale and multiphysics systems / Ed. S. Kadry, A. El Hamy. — Springer, 2015. — 805 p. ISBN 978-3-319-07166-4
11. Handbook of materials failure analysis with case studies from the oil and gas industry / Ed. A. Makhoulf. — Elsevier, 2016. — 430 p.
12. **Ahmed M., Melchers R. E.** Probabilistic analysis of underground pipelines subject to combined stress and corrosion / Eng. Struct. 1997. Vol. 19. N 12. P. 988 – 994.
13. **Zelmati D., Bouledroua O., Hafsi Z., Milos B., Djukic M. B.** Probabilistic analysis of corroded pipeline under localized corrosion defects based on the intelligent inspection tool / Eng. Failure Anal. 2020. 115. 1046083. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104683
14. **Velázquez J. C., Hernández-Sánchez E., Terán G., Capula-Colindres S., Diaz-Cruz M., Cervantes-Tobón A.** Probabilistic and Statistical Techniques to Study the Impact of Localized Corrosion Defects in Oil and Gas Pipelines: A Review / Metals 2022. 12. 576. DOI: 10.3390/met12040576

15. ASME B31G-1991. Manual for determining the remaining strength of corroded pipeline (supplement to ANSI/ASME B31G code for pressure piping). — New York: ASME, 1991.
16. **Fouladirad M., Giorgio M., Pulcini G.** A transformed gamma process for bounded degradation phenomena. *Quality and Reliability Engineering International*. 2022. Vol. 39. N 2. P. 546 – 564.
17. **Guida M., Penta F.** A gamma process model for the analysis of fatigue crack growth data / *Eng. Fract. Mech.* 2015. N 142. P. 21 – 49.
18. **Han D.** Development of a load sharing policy by managing the residual life based on stochastic process. <https://business.utsa.edu/wp-content/uploads/2018/03/0010MSS-694-2016.pdf>

REFERENCES

1. **Makhutov N. A.** Strength and safety. Fundamental and applied researches. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
2. **Kuzmin D. A.** Research of residual defectiveness using methods of probability theory / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2021. Vol. 87. N 9. P. 44 – 49 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-9-44-49
3. **Lepikhin A. M., Morozov E. M., Makhutov N. A., Le-schenko V. V.** Assessment of failure probabilities and the allowable size of defects in structural elements using the criteria of fracture mechanics / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2022. Vol. 88. N 3. P. 41 – 50 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-3-41-50
4. **Haldar A., Manadevan S.** Probability, reliability and statistical methods in engineering design. — John Wiley, 2000. — 304 p.
5. **Todinov M. T.** Reliability and risk models. — John Wiley, 2005. — 322 p.
6. **Bogdanoff J. L., Kozin F.** Probabilistic models of cumulative damage. — Moscow: Mir, 1989. — 342 p. [Russian translation].
7. **Abdel-Hameed M.** A gamma wear process / *IEEE Trans. Reliab.* 1975. Vol. 24. Issue 2. P. 152 – 153.
8. **Younsi K., Chebouba A., Zemmour N., Smati A.** Pipeline Integrity Assessment Using Probabilistic Transformation Method and Corrosion Growth Modeling Through Gamma Distribution / *Oil and Gas Facilities*. 2013. April. P. 51 – 60.
9. **Noortwijk J. M., Pandey M. D.** A stochastic deterioration process for time-depend reliability analysis. In.: *Proceeding of the eleventh IFIP WG 7.5 working conference on reliability and optimization of structural systems*. 2 – 5 November 2003, Banff, Canada. P. 259 – 265.
10. Numerical methods for reliability and safety assessment. Multi-scale and multiphysics systems / Ed. S. Kadry, A. El Hamy. — Springer, 2015. — 805 p. ISBN 978-3-319-07166-4
11. Handbook of materials failure analysis with case studies from the oil and gas industry / Ed. A. Makhlof. — Elsevier, 2016. — 430 p.
12. **Ahmed M., Melchers R. E.** Probabilistic analysis of underground pipelines subject to combined stress and corrosion / *Eng. Struct.* 1997. Vol. 19. N 12. P. 988 – 994.
13. **Zelmati D., Bouledroua O., Hafsi Z., Milos B., Djukic M. B.** Probabilistic analysis of corroded pipeline under localized corrosion defects based on the intelligent inspection tool / *Eng. Failure Anal.* 2020. 115. 1046083. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104683
14. **Velázquez J. C., Hernández-Sánchez E., Terán G., Capula-Colindres S., Diaz-Cruz M., Cervantes-Tobón A.** Probabilistic and Statistical Techniques to Study the Impact of Localized Corrosion Defects in Oil and Gas Pipelines: A Review / *Metals* 2022. 12. 576. DOI: 10.3390/met12040576
15. ASME B31G-1991. Manual for determining the remaining strength of corroded pipeline (supplement to ANSI/ASME B31G code for pressure piping). — New York: ASME, 1991.
16. **Fouladirad M., Giorgio M., Pulcini G.** A transformed gamma process for bounded degradation phenomena. *Quality and Reliability Engineering International*. 2022. Vol. 39. N 2. P. 546 – 564.
17. **Guida M., Penta F.** A gamma process model for the analysis of fatigue crack growth data / *Eng. Fract. Mech.* 2015. N 142. P. 21 – 49.
18. **Han D.** Development of a load sharing policy by managing the residual life based on stochastic process. <https://business.utsa.edu/wp-content/uploads/2018/03/0010MSS-694-2016.pdf>