

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-519-529>

УДК 621.644.07: 004.052.3

## Алгоритм расчета надежности единичного линейного участка стального подземного трубопровода

Струцкий Н. В.<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. Романюк В. Н.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ГПО «Белтопгаз» (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023  
Belarusian National Technical University, 2023

**Реферат.** Наиболее распространенные технические системы в мире – стальные трубопроводные коммуникации в подземном исполнении (теплопроводы, магистральные и распределительные нефте- и газопроводы и пр.). Соответственно оценка надежности таких технических систем и их составных частей представляет большой теоретический и практический интерес. На современном уровне развития расчет надежности стал обязательным этапом при проектировании и диагностировании (в процессе эксплуатации) ответственных технических систем и в частности трубопроводных. В основе надежного расчета, в явном или неявном виде, всегда лежит модель рассчитываемого объекта. Именно от адекватности модели реальным физическим связям и процессам внутри технического объекта зависят точность и практическая ценность расчетных методик. Предлагается рассматривать единичный линейный участок стального подземного трубопровода как сложную техническую систему из неравноценных с точки зрения надежности элементов – основного элемента (стальной трубы) и вспомогательных защитных элементов, объединенных в подсистемы (блоки). Алгоритм расчета надежности объекта построен на основе метода структурных схем (блок-схем) с учетом влияния эффекта последствия отказа вспомогательного элемента (элементов) на параметры надежности основного элемента, что более адекватно отражает специфические особенности устройства и функционирования стальных трубопроводов по сравнению с применяемыми статическими моделями. Рассмотрены варианты конструктивного исполнения стального подземного трубопровода с защитным изоляционным покрытием и с комплексной защитой от коррозии (изоляция и электрохимическая защита), для которых получены уточненные формулы для расчета основных показателей надежности (безотказности).

**Ключевые слова:** подземный стальной трубопровод, сложная техническая система, модель надежности, последствие отказа, изоляция, электрохимическая защита, балластировка

**Для цитирования:** Струцкий, Н. В. Алгоритм расчета надежности единичного линейного участка стального подземного трубопровода / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // *Наука и техника*. 2023. № 6. С. 519–529. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-519-529>

## Algorithm for Calculating Reliability of Single Linear Section of Steel Underground Pipeline

N. V. Strutsky<sup>1)</sup>, V. N. Romaniuk<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Beltopgaz SPA (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** One of the most widespread technical systems in the world is underground steel pipeline communications (heat pipelines, main and distribution oil and gas pipelines, etc.). Accordingly, reliability assessment of such technical systems

### Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-92-16  
pte@bntu.by

### Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-92-16  
pte@bntu.by

and their components is of great theoretical and practical interest. At the modern level of development, reliability calculation has become a mandatory stage in the design and diagnostics (during operation) of any technical systems in general, and in particular pipeline systems. A reliable calculation, either explicitly or implicitly, is always based on the model of the object being calculated. It is the adequacy of the model to the real physical relations and processes inside the technical object that determines the accuracy and practical value of calculation methods. It is proposed to consider a single linear section of an underground steel pipeline as a complex technical system of unequal elements from the point of view of reliability – the main element (steel pipe) and auxiliary protective elements combined into subsystems (blocks). The algorithm for calculating the reliability of the object is based on the method of block diagrams, taking into account the influence of the aftereffect of the failure of an auxiliary element (elements) on the reliability parameters of the main element, which more adequately reflects the specific features of the design and operation of steel pipelines compared with the applied static models. The variants of structural design of a steel underground gas pipeline with a protective insulation coating and with complex corrosion protection (insulation and electrochemical protection) are considered, for which refined formulas are obtained for calculating the main reliability (failure-free) indicators.

**Keywords:** underground steel pipeline, complex technical system, reliability model, failure aftereffect, insulation, electrochemical protection, ballastin

**For citation:** Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2023) Algorithm for Calculating Reliability of Single Linear Section of Steel Underground Pipeline. *Science and Technique*. 22 (6), 519–529. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-519-529> (in Russian)

## Введение

В общем приближении любую трубопроводную коммуникацию можно смоделировать как совокупность типовых элементов – участков трубопроводов, объединенных в локальные сети различных мощностей и масштабов.

Определим, что этот типовой элемент – линейный участок стального подземного трубопровода, включающий некоторое ограниченное количество стандартных заводских труб с монтажными сварными соединениями. Условимся, что данный участок однороден по конструктивным характеристикам, технологическим параметрам и условиям эксплуатации.

Являясь элементом для построения сложных пространственных структур (сетей), такой единичный трубопровод в рамках системного подхода, в свою очередь, также должен рассматриваться как техническая система (ТС). Более того, его необходимо отнести к сложным техническим системам, то есть системам, поведение которых нелегко моделировать из-за сложных зависимостей между их частями или из-за сложных взаимодействий между данной системой и окружающей средой [1].

Действительно, внешней средой для стального подземного трубопровода служит почва (грунт), сама по себе являющаяся очень сложной и изменчивой (динамической) физико- и химико-биологической системой [2], оказывающей на трубопровод целый комплекс воздействий. Соответственно необходимость компенсации этих воздействий в их различных сочета-

ниях влечет усложнение конструктива трубопровода.

Так, стальные подземные трубопроводы должны быть защищены от коррозии. Как правило, это комплексная защита: антикоррозийное изоляционное покрытие отделяет поверхность трубы от агрессивной внешней среды, а электрохимическая защита (ЭХЗ) максимально подавляет коррозионный процесс в местах, где электрический контакт между трубой и грунтом все же возник.

Как вариант, подземные трубопроводы (например, теплопроводы) могут изолироваться от внешней среды с помощью прокладки в каналах (лотках). Также теплопроводы во избежание потерь теплоты обеспечиваются тепловой изоляцией.

На обводненных участках и участках подводных переходов трубопроводы, в которых транспортируемая среда легче воды (газ, нефть), могут оборудоваться пригрузами (утяжелителями) для закрепления в проектном положении.

В местах пересечения с транспортными и некоторыми смежными коммуникациями на трубопроводах устанавливаются защитные футляры.

Таким образом, стальной трубопровод, как правило, включает в себя целый ряд различных элементов, каждый из которых исполняет самостоятельную функцию, имеет свои специфические физические свойства и конструкцию, а также отыгрывает свою собственную роль с точки зрения надежности.

### Структурная схема надежности единичного линейного участка газопровода

Проанализируем характер влияния перечисленных выше элементов стального подземного трубопровода на общую надежность, а также целесообразность их выделения и включения в надежностьную модель.

По определению, трубопровод состоит из труб и соединений между ними. Принимая за условие равнопрочность и близкую коррозионную стойкость металла сварного соединения и основного металла трубы, на данном уровне рассмотрения допустимо считать их за один элемент (не выделять стык).

Коррозионный фактор несет основную опасность для стального подземного сооружения. Соответственно состояние и работа элементов антикоррозийной защиты стального трубопровода оказывают существенное влияние на его надежность. Таким образом, данные элементы должны присутствовать в модели в обязательном порядке.

Затопление или занос канала (лотка) грунтом значительно ухудшает коррозионную ситуацию, что также должно учитываться. В свою очередь, состояние теплоизоляции (выполняемой, как правило, из гидрофильных материалов) на коррозионные процессы влияния не оказывает, функция данного элемента – исключительно энергосберегающая.

Функциональный отказ балластировки повлечет за собой изменение пространственного положения трубопровода и возникновение напряженно-деформированного состояния, поэтому данный элемент (при наличии) должен включаться в модель надежности.

Футляры на трубопроводах в большей степени предназначены для защиты пересекаемых транспортных и инженерных коммуникаций от вредного или даже опасного (например, в случае выхода горючего газа) воздействия транспортируемой среды. Вместе с тем участки переходов под железнодорожными путями, магистральными автомобильными трассами могут подвергаться повышенным механическим нагрузкам. В таком случае футляр будет необходим для придания конструкции дополнительной прочности и также должен учитываться при моделировании.

Сгруппировав элементы трубопровода по роли и степени важности в обеспечении общей надежности, получим структурированный набор элементов трубопровода, включающий в себя трубу в качестве основного элемента (ОЭ) и два блока (подсистемы) вспомогательных элементов (ВЭ) для защиты ОЭ от коррозии и механических напряжений:

- 1) основной элемент – труба;
- 2) защитный блок ВЭ I:
  - антикоррозийная изоляция (гидроизоляция);
  - электрохимзащита (ЭХЗ);
  - канал (лоток);
- 3) защитный блок ВЭ II:
  - футляр;
  - балластировка.

Следует отметить, что такой элемент, как канал, защищает трубопровод одновременно от коррозионного и механического воздействия внешней среды, поэтому может быть включен в оба защитных блока элементов с одинаковым основанием.

Соединим элементы единичного участка трубопровода в логическую схему, на основании которой в дальнейшем будет возможно построить математическую модель и выполнить количественную оценку надежности системы.

Наиболее распространенным способом визуального представления надежностьной модели технической системы является построение структурной схемы надежности (или блок-схемы надежности – reliability block diagram, RBD).

Блок-схемы относятся к статическим моделям, в рамках которых состояния системы определяются наборами работоспособных и неработоспособных элементов в определенный момент времени. Те элементы, отказ которых вызывает отказ системы, имеют в схеме последовательное соединение, элементы, отказ которых приводит лишь к увеличению вероятности отказа, соединяются параллельно. При параллельном соединении элементов отказ системы происходит лишь при совмещении отказов частей системы. По сути, блок-схема надежности представляет собой наглядную интерпретацию вероятностной задачи [3].

Приняв связи между ОЭ и блоками ВЭ последовательными, а связи между ВЭ внутри защитных блоков параллельными, возможно получить варианты блок-схем для стальных подземных трубопроводов различного назначения и конструктивного исполнения (рис. 1).

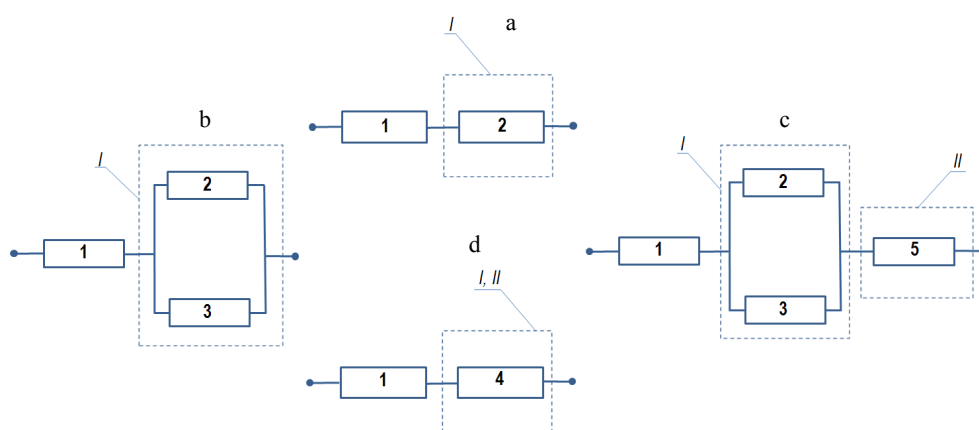


Рис. 1. Варианты блок-схем надежности стального подземного трубопровода: а – с изоляцией; б – с изоляцией и электрохимзащитой; с – то же, что и б, но с балластировкой; d – в канале; 1– труба; 2 – изоляционное покрытие; 3 – электрохимическая защита; 4 – канал; 5 – балластировка

Fig. 1. Options for block diagrams of the reliability of a steel underground pipeline: a – with insulation; b – with insulation and electrochemical protection; c – the same as b, but with ballasting; d – in the channel; 1 – pipe; 2 – insulating coating; 3 – electrochemical protection; 4 – channel; 5 – ballasting

На практике, учитывая набор и специфику связей составляющих элементов, для стальных подземных трубопроводов чаще будет характерна последовательно-параллельная структура.

Вопросам моделирования надежности трубопроводов посвящено достаточное количество исследований, предлагающих собственные принципы обоснования и построения соответствующих структурных схем. Для нефте- и газопроводов (в основном магистральных), например, в этой области можно указать работы [4–8].

Представленные в настоящей статье структурные схемы принципиально наиболее близки к варианту, предложенному А. М. Зиневичем в работе [4] для линейной части магистральных газопроводов. Вместе с тем характерный для данной работы подход, предполагающий непосредственное включение в модель трубопровода в качестве его элементов траншеи и грунт, достаточно спорен – они все же являются частью эксплуатационной среды. На наш взгляд, внешнюю среду при рассмотрении подземной коммуникации продуктивнее моделировать как отдельную сложную систему, однако этот вопрос выходит за рамки данной статьи.

Представляется, что предлагаемые в настоящей статье блок-схемы единичного стального подземного трубопровода адекватны реальной структуре моделируемого объекта на своем

уровне рассмотрения, а также позволяют учесть конструктивные особенности трубопроводных коммуникаций различного назначения.

Так, например, варианты на рис. 1а, б отражают структуру участка стального нефте- и газопровода, теплопровода бесканальной прокладки с антикоррозийной защитой, вариант рис. 1с – нефте- и газопровода с балластировкой, рис. 1d – теплопровода канальной прокладки.

### Алгоритм расчета основных показателей надежности

Конечным результатом надежностного расчета ТС является определение ее количественных показателей надежности. Номенклатура показателей надежности технических объектов регламентируется межгосударственным стандартом [9]. Для трубопроводных коммуникаций, как высоконадежных систем (как правило, связанных с жизнеобеспечением населения и зачастую транспортирующих взрыво- и пожароопасный продукт), это, в первую очередь, показатели безотказности.

Поскольку возникновение отказов для высоконадежных систем по возможности должно исключаться, будем условно рассматривать трубопровод как невосстанавливаемую систему, что одновременно упростит расчеты.

Основной показатель безотказности – вероятность безотказной работы (ВБР)  $P(t)$ , то есть

вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа объекта не возникнет.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  связана с функцией распределения  $F(t)$  и функцией плотности распределения  $f(t)$  наработки до отказа следующими дифференциальными соотношениями:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1)$$

На практике иногда удобно использовать показатель вероятности отказа  $Q(t)$ , определяемый как вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени. Вероятность наступления хотя бы одного отказа на отрезке  $[0, t]$  определяют по формуле

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t). \quad (2)$$

Если известна функция плотности распределения времени до отказа  $f(t)$ , то ВБР можно рассчитать по выражению

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt, \quad (3)$$

а вероятность отказа  $Q(t)$  по формуле

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt. \quad (4)$$

Как видно из графической интерпретации на рис. 2а, вероятность безотказной работы  $P(t)$  и вероятность отказа  $Q(t)$  равны соответственно площадям криволинейных трапеций под функцией плотности распределения  $f(t)$  на интерва-

лах  $[0, t]$  и  $[t, \infty]$ . По определению, в начальный момент  $t = 0$  объект находится в работоспособном состоянии. С ростом наработки ВБР невосстанавливаемого объекта  $P(t)$  монотонно уменьшается от 1, асимптотически приближаясь к 0 при  $t \rightarrow \infty$ , а вероятность отказа  $Q(t)$  растет от 0 до 1 [10].

Среднее время безотказной работы  $T_o$  (математическое ожидание времени работы объекта до отказа) равно площади под кривой зависимости ВБР от наработки объекта (рис. 2б) и может быть получено с помощью выражения

$$T_o = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (5)$$

При расчетах надежности широко используется показатель интенсивности отказов (ИО)  $\lambda(t)$ , представляющий собой условную плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемую при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (6)$$

Интенсивность отказов удобна тем, что через нее можно выразить ВБР объекта:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}, \quad (7)$$

где  $\lambda(t)dt$  – вероятность того, что элемент, безотказно проработавший в интервале наработки  $[0, t]$ , откажет в интервале  $[t, t + dt]$ .

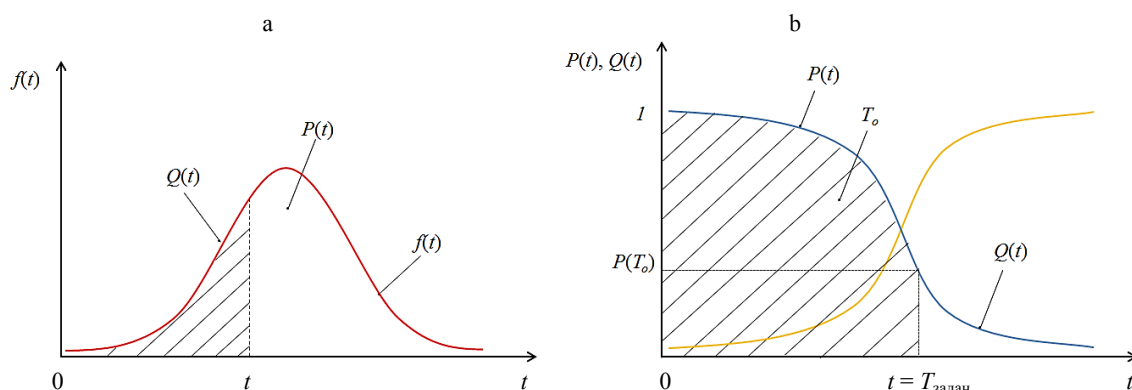


Рис. 2. Графическая интерпретация основных показателей безотказности: а – вероятностей безотказной работы и отказа; б – среднего времени безотказной работы

Fig. 2. Graphical representation of main reliability indicators: а – probabilities of failure-free operation and failure; б – average time of failure-free operation

При  $\lambda(t) = \text{const}$  получаем экспоненциальное распределение вероятности безотказной работы

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (8)$$

Расчет надежности единичного участка трубопровода, как ТС, имеющей различные варианты конструктивного исполнения, будет включать две основные операции:

- определение надежности элементов, составляющих систему;
- определение надежности различных комбинаций этих элементов.

Существует точная математическая связь между надежностью системы и надежностью ее элементов. Точность результатов расчета не будет зависеть от аппарата теории вероятностей, так как вероятностные соотношения сами по себе совершенно точны [11].

Условимся, что для каждого из элементов имеет место экспоненциальное распределение вероятности безотказной работы, а также для каждого из них определены (статистическим методом, экспериментально, либо рассчитаны с учетом конструкции элемента и данных о свойствах материалов) интенсивности отказов  $\lambda_3(t)$ .

Тогда все представленные на рис. 1 последовательные и параллельно-последовательные структуры позволяют, используя основные теоремы теории вероятности случайных событий и логико-вероятностные методы, осуществить прямой (непосредственный) расчет общей надежности ТС по параметрам надежности элементов.

Так, в самом общем случае формула для расчета ВБР единичного участка трубопровода будет иметь вид

$$P(t) = P_{\text{оэ}}(t)P_{\text{вбл I}}(t)P_{\text{вбл II}}(t), \quad (9)$$

где  $P_{\text{оэ}}(t)$ ,  $P_{\text{вбл I}}(t)$ ,  $P_{\text{вбл II}}(t)$  – ВБР основного элемента, защитных блоков I и II соответственно.

Определим ВБР системы при различных конфигурациях элементов. Для наиболее простых вариантов схемы рис. 1а, d выражение (5) преобразуется к виду

$$P(t) = P_{\text{тр}}(t)P_{\text{из}}(t) \text{ или } P(t) = P_{\text{тр}}(t)P_{\text{кан}}(t); \quad (10)$$

для варианта рис. 1б

$$P(t) = P_{\text{тр}}(t)(P_{\text{из}}(t) + P_{\text{эхз}}(t) - P_{\text{из}}(t)P_{\text{эхз}}(t)), \quad (11)$$

для варианта рис. 1с:

$$P(t) = P_{\text{тр}}(t)(P_{\text{из}}(t) + P_{\text{эхз}}(t) - P_{\text{из}}(t)P_{\text{эхз}}(t))P_{\text{балл}}(t), \quad (12)$$

где  $P_{\text{тр}}(t)$ ,  $P_{\text{из}}(t)$ ,  $P_{\text{эхз}}(t)$ ,  $P_{\text{балл}}(t)$  – ВБР стальной трубы, изоляции, ЭХЗ и балластировки, рассчитываемые по значениям их ИО соответственно.

Подобные алгоритмы позволяют определять показатели надежности технических систем различного функционального назначения и уровня сложности, они хорошо документированы [12, 13] и нашли широкое применение на практике. Вместе с тем здесь необходимо отметить следующий принципиальный момент.

В действительности, находясь в работоспособном состоянии, труба сама по себе полностью обеспечивает нормальное функционирование системы (транспортировка продукта с заданными параметрами) с некоторым уровнем надежности. Это согласуется с известным определением основного элемента [14, 15], в соответствии с которым ОЭ – элемент основной физической структуры системы, минимально необходимый для выполнения возложенных на нее задач.

Тогда, вне зависимости от количества и работоспособности ВЭ, а также конфигурации их связей, немедленным и безусловным отказом ТС в нашем и подобных ему случаях будет являться только отказ ОЭ.

Следовательно, если производить расчет без учета данной особенности трубопроводов, то полученная оценка надежности системы будет включать в себя допущение о моментальном выходе из строя ОЭ вслед за ВЭ, либо искусственное расширение понятия отказа системы за счет включения в него отказа ВЭ, что противоречит физическим связям и ролям элементов в системе. Другими словами, при расчете ВБР в предположении независимости отказов элементов системы будет получаться заниженное значение [16, 17].

Как правило, при осуществлении инженерных расчетов так и поступают, однако при этом модель теряет адекватность реальному объекту,

и сами расчеты приобретают преимущественно теоретический характер. В этой связи возникает задача найти необходимый баланс между требуемым уровнем адекватности модели и ее простотой. То есть необходимо адаптировать расчет надежности с использованием структурных схем к специфике трубопроводных систем, сохранив присущие данному методу преимущества: удобство использования и наглядность.

### Расчет с учетом эффекта последствия отказа ВЭ

Существуют различные подходы к соответствующей адаптации метода структурных схем для расчета надежности сложных систем. В контексте рассматриваемого нами случая можно выделить два из них.

Так, зачастую в режиме технического объекта можно выделить несколько отдельных фаз, в каждой из которых система будет иметь различные характеристики надежности. В качестве примера такой ТС в [15] приводится бортовая вычислительная система самолета, работающая в двухфазном режиме, – управление взлетом/управление полетом. Вибрация при взлете приводит к повышению интенсивностей отказов электронных элементов, вследствие чего ИО составляющих систему компьютеров на первой фазе выше, чем на второй.

Тогда каждую фазу логично рассматривать независимо, используя свои структурные схемы для каждой фазы либо одну схему с различными значениями ИО, в зависимости от ситуации. Такая опция реализована, например, в специализированном программном продукте Windchill Quality Solutions в виде так называемых «фазовых диаграмм».

Для построения фазовых диаграмм задается количество, длительность и очередность фаз, а также конфигурация системы, вид и параметры функций распределения наработок до отказа элементов для каждой фазы. При этом вектор распределения вероятностей состояний системы на конец  $i$ -й фазы является вектором начальных состояний для  $i + 1$ -й фазы [15].

Другой подход основан на выделении технических систем с «последствием отказов».

Под последствием отказа понимается ситуация, при которой отказ некоторого элемента влечет возрастание нагрузки на другой элемент системы, вследствие чего распределение времени до отказа второго элемента изменяется [18, 19].

Соответственно математическая модель расчета такой системы должна учитывать этот эффект, при этом построения отдельных структурных схем для периодов наработки с различными параметрами надежности может не потребоваться. Исходя из данной логики, в частности в работе [20], решается задача расчета надежности радиоэлектронных комплексов, обладающих вспомогательными элементами (сервисными устройствами), снижающими диапазон внешних воздействий на основную аппаратуру.

Хотя стальной подземный трубопровод до настоящего времени не рассматривался как система с последствием отказов, однако отнесение его к таким системам абсолютно логично вытекает из его физической структуры.

Проанализируем в данном ключе представленные на рис. 1 простейшие варианты структурных схем рис. 1а, д. Это может быть участок теплопровода канальной прокладки либо бесканальная коммуникация (нефте- и газопровод, теплопровод) с антикоррозийным изоляционным покрытием, не оборудованная средствами электрохимзащиты (данный вариант характерен, например, для распределительных сетей [21], прокладываемых в низкоагрессивных, высокоомных грунтах).

Итак, мы имеем систему из двух элементов: ОЭ и ВЭ. При этом роль ВЭ (будь то канал, или изоляция) состоит, по сути, в приведении уровня влияния на ОЭ внешних воздействующих факторов (механического, коррозионного) до приемлемого с точки зрения достижения необходимой долговечности технической системы.

Когда в некоторый момент времени  $\tau$  ВЭ отказывает, то ОЭ, будучи исправным до момента  $\tau$ , проработает еще время  $(t - \tau)$  со скачкообразным переходом на новый, более низкий уровень надежности. Таким образом, в системе действительно возникает последствие, выражающееся в существенном (изменяющем ха-

раक्टर процесса) запаздывании наступления ее конечного (неработоспособного) состояния.

Вместе с тем, поскольку данная особенность системы обусловлена кардинально различающимися ролями основного и вспомогательных элементов, с точки зрения надежности, возможно, более точно определить ее как «систему с неравноценными элементами».

Такая система будет иметь два работоспособных состояния (с работоспособным ВЭ, и неработоспособным ВЭ), каждое из которых характеризуется собственными показателями надежности –  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$ . Поскольку указанные состояния ТС представляют собой несовместимые события, полная вероятность безотказной работы системы будет равна

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t). \quad (13)$$

ВБР системы при исправности обоих элементов составит

$$P_1(t) = P_{оэ}(t)P_{вэ}(t). \quad (14)$$

Вероятность безотказной работы ТС при исправном ОЭ и неисправном ВЭ определяется усреднением по  $\tau$  условной ВБР  $P_{оэ}(t)$  по формуле

$$P_2(t) = \int_0^t P_{оэ}(\tau, t) d(Q_{вэ}(\tau)), \quad (15)$$

где  $P_{оэ}(\tau, t)$  – вероятность того, что ОЭ исправно проработает время  $\tau$  при исходном уровне надежности ТС, а затем еще время  $(t - \tau)$ , но уже при остаточном, сниженном уровне надежности;  $d(Q_{вэ}(\tau)) = -d(P_{вэ}(\tau)) = -P'_{вэ}(\tau) \cdot d\tau$  – вероятность того, что ВЭ исправно проработает время  $\tau$  и откажет на малом промежутке времени  $d\tau$ , примыкающем к  $\tau$  справа (плотность  $f_{вэ}(\tau)$  распределения времени безотказной работы ВЭ, умноженная на  $d\tau$ ).

Используя формулу полной вероятности, получаем следующее выражение для ВБР системы:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) = P_{оэ}(t)P_{вэ}(t) + \int_0^t P_{оэ}(\tau, t) d(Q_{вэ}(\tau)). \quad (16)$$

Оценку уровня влияния последствия отказа ВЭ на надежность ОЭ целесообразно про-

изводить с помощью безразмерного коэффициента влияния  $K_{вп}$  [20]

$$K_{вп} = \frac{\text{Уровень 2 параметра ОЭ (после момента } \tau)}{\text{Уровень 1 параметра ОЭ (до момента } \tau)}. \quad (17)$$

Если параметром является ИО ( $\lambda$ ), то имеем

$$K_{вп} = \frac{\lambda_{оэ2}}{\lambda_{оэ1}}. \quad (18)$$

При экспоненциальном распределении безотказной работы для варианта рис. 1а (стальной трубопровод с антикоррозийной изоляцией) получаем

$$P_1(t) = e^{-(\lambda_{тр} + \lambda_{из}t)}, \quad (19)$$

где  $\lambda_{из}$  – интенсивность отказов защитного покрытия;  $\lambda_{тр}$  – ИО трубы (без привязки к изоляции).

Плотность  $f_{из}(\tau)$  распределения времени безотказной работы изоляционного покрытия

$$f_{из}(\tau) = -P'_{из}(\tau) = \lambda_{из} e^{-\lambda_{из}\tau}. \quad (20)$$

Точный вид функции условной вероятности  $P_{мп}(\tau, t)$ :

$$P_{мп}(\tau, t) = e^{-\int_0^t \lambda_{мп}(\tau) d\tau} = e^{-\left(\int_0^\tau \lambda_{мп1}(\tau) d\tau + \int_\tau^t \lambda_{мп2}(\tau) d\tau\right)} = e^{-(\lambda_{мп1} \cdot \tau + \lambda_{мп2} \cdot (t - \tau))}, \quad (21)$$

где  $(\lambda_{тр1}\tau + \lambda_{тр2}(t - \tau))$  – поток отказов основного элемента (трубы) за время  $t$ , зависящий от момента времени  $\tau$ .

Возможны два крайних случая наступления отказа изоляционного покрытия. Если оно откажет непосредственно в начале интервала  $[\tau, t]$ , т. е. при  $\tau = 0$ , тогда  $P_{тр}(\tau, t)$  на всем оставшемся интервале перейдет в функцию

$$P_1(t) = e^{-\lambda_{мп2}t}. \quad (22)$$

В случае отказа ВЭ в момент  $t$  в конце интервала  $[0, t]$

$$P_1(t) = e^{-\lambda_{мп2}t}. \quad (23)$$

Условная вероятность  $P_2(t)$  составит



$$P_2(t) = \int_0^t \lambda_{из} e^{-\lambda_{из}\tau} e^{-(\lambda_{тр1}\tau + \lambda_{тр2}(t-\tau))} d\tau = \left( \frac{\lambda_{из}}{\lambda_{из} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}} \right) \left( e^{-\lambda_{тр2}t} - e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{тр1})t} \right). \quad (24)$$

Тогда формула для расчета ВБР участка стального трубопровода с антикоррозийным изоляционным покрытием примет следующий вид:

$$P(t) = e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{тр1})t} + \left( \frac{\lambda_{из}}{\lambda_{из} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}} \right) \left( e^{-\lambda_{тр2}t} - e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{тр1})t} \right). \quad (25)$$

Среднее время безотказной работы  $T_o$  определяется по соотношению

$$T_o = \int_0^{\infty} P(t) dt = \left( \frac{1}{\lambda_{из} + \lambda_{тр1}} \right) + \left( \frac{\lambda_{из}}{(\lambda_{из} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}) \left( \left( \frac{1}{\lambda_{тр1}} \right) - \left( \frac{1}{\lambda_{из} + \lambda_{тр1}} \right) \right)} \right). \quad (26)$$

Формулы для варианта рис. 1д (теплопровод канальной прокладки) будут аналогичны приведенным выше, с заменой ИО изоляции  $\lambda_{из}$  на ИО канала  $\lambda_{кан}$ .

Теперь подробнее рассмотрим как наиболее распространенный в инженерной практике вариант, представленный на рис. 1б. Это участок стального трубопровода подземной бесканальной прокладки, обеспеченный комплексной защитой от коррозии. Данный вариант характерен для большинства распределительных и практически всех магистральных стальных трубопроводов [21, 22].

В такой конфигурации системы ЭХЗ и изоляцию можно представить как взаимно резервирующие (дублирующие) элементы, выполняющие одну и ту же функцию различными способами. Теоретически, абстрагируясь от во-

проса экономической эффективности активной защиты неизолированной трубы, находясь в состоянии полной работоспособности, каждый из этих элементов в отдельности может обеспечить защиту трубопровода от коррозии.

Потеря целостности изоляции является необходимым условием образования коррозионного повреждения. Вместе с тем даже одновременный отказ активной и пассивной составляющих антикоррозийной защиты не означает немедленного и безусловного отказа системы. Коррозионное повреждение не наступает непосредственно в момент контакта не защищенного катодно металла трубы с грунтом, ему предшествует инкубационный период, зависящий от ряда факторов.

Однако в любом случае отказ средств антикоррозийной защиты существенно ухудшит надежность стального трубопровода: его ВБР снизится, а интенсивность отказов вырастет.

Поскольку в защитной подсистеме имеет место дублированное соединение элементов, ВБР вспомогательного блока может быть рассчитана по формуле

$$P_{вбл}(t) = e^{-\lambda_{из}t} + e^{-\lambda_{эхз}t} - e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{эхз})t}. \quad (27)$$

ВБР системы при исправности всех элементов  $P_1(t)$ , выраженная через интенсивность отказов ВЭ, будет равна

$$P_1(t) = e^{-\lambda_{тр1}t} \left( e^{-\lambda_{из}t} + e^{-\lambda_{эхз}t} - e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{эхз})t} \right). \quad (28)$$

Плотность  $f_{вбл}(t)$  распределения времени безотказной работы антикоррозийного вспомогательного блока составит

$$f_{вбл}(\tau) = -d \left( e^{-\lambda_{из}\tau} + e^{-\lambda_{эхз}\tau} - e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{эхз})\tau} \right) d\tau = \left( \lambda_{из} e^{-\lambda_{эхз}\tau} + \lambda_{эхз} e^{-\lambda_{из}\tau} - \lambda_{эхз} - \lambda_{из} \right) e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{эхз})\tau}. \quad (29)$$

Тогда выражение для  $P_2(t)$  примет вид

$$P_2(t) = \int_0^t e^{-(\lambda_{тр1}\tau + \lambda_{тр2}(t-\tau))} \left( \lambda_{из} e^{-\lambda_{эхз}\tau} + \lambda_{эхз} e^{-\lambda_{из}\tau} - \lambda_{из} - \lambda_{эхз} \right) e^{-(\lambda_{эхз} + \lambda_{из})\tau} d\tau = e^{-\lambda_{тр2}t} e^{-(\lambda_{тр1} - \lambda_{тр2})t} \times \left( \left( \frac{\lambda_{из} + \lambda_{эхз}}{\lambda_{из} + \lambda_{эхз} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}} \right) \cdot e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{эхз})t} - \left( \frac{\lambda_{из}}{\lambda_{из} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}} \right) e^{-\lambda_{из}t} - \left( \frac{\lambda_{эхз}}{\lambda_{эхз} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}} \right) e^{-\lambda_{эхз}t} \right). \quad (30)$$

Далее, в соответствии с выражениями (13) и (5) получаем формулы для расчета ВБР  $P(t)$  и среднего времени безотказной работы  $T_0$  единичного участка стального трубопровода, обеспеченного комплексной защитой от коррозии.

Окончательные выражения не приводятся из-за своей внешней сложности, однако на практике они легко могут быть рассчитаны с помощью широко распространенных в настоящее время программ автоматизации математических расчетов (MathLab, Mathematica, Maple и другие).

### ВЫВОДЫ

1. В статье на основе анализа конструктивного устройства и особенностей функционирования трубопроводных систем определены элементы, требующие включения в надежность-ную модель единичного линейного участка стального подземного трубопровода. Построены оригинальные структурные схемы надежности для различных вариантов конструктивного исполнения трубопроводов.

2. Впервые показано, что линейный участок стального подземного трубопровода с точки зрения надежности может рассматриваться как сложная техническая система с неравноценными элементами (основным элементом, определяющим работоспособное/неработоспособное состояние системы, и вспомогательными, защитными элементами, снижающими уровень воздействия внешних влияющих факторов), что позволяет повысить адекватность надежностного моделирования. Предложен усовершенствованный алгоритм расчета надежности трубопровода, учитывающий влияние эффекта последствия отказа вспомогательного элемента (элементов) на общую надежность системы.

3. Представлены математические модели надежности линейного участка трубопровода для вариантов конструктивного исполнения «труба – изоляция» («труба – канал») и «труба – изоляция – электрохимическая защита», наиболее распространенных в трубопроводных системах. Для данных вариантов получены формулы для расчета основных показателей надежности (безотказности), применение которых может повысить точность оценки (прогноза) надежности таких трубопроводных ком-

муникаций, как газопроводы, теплопроводы, нефтепроводы, на стадии проектирования и в процессе эксплуатации (на этапе технического диагностирования).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков, В. Я. Сложные технические системы / В. Я. Цветков // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 3 (20). С. 86–92.
2. Розанов, Б. Г. Живой покров Земли / Б. Г. Розанов. М.: Педагогика, 1989. 128 с.
3. Справочник по надежности / В. Херд [и др.]; пер. Ф. С. Соловейчика; под ред. Б. Е. Бердичевского. М.: Мир, 1970. Т. 3. 376 с.
4. Зиневич, А. М. Научно-техническое обеспечение надежности сооружения линейной части магистральных трубопроводов / А. М. Зиневич. М.: Информнефтегазстрой, 1984. 132 с.
5. Кац, Л. Некоторые вопросы исследования надежности трубопроводов ВНИИЭгазпром / Л. Кац, Ж. Линковский. М.: Экспресс-информация. 1970. № 23. С. 15–28.
6. Харионовский, В. В. Вопросы надежности и живучести магистральных трубопроводов как линейных систем / В. В. Харионовский, В. П. Родин // Вопросы надежности газопроводных конструкций: сб. науч. трудов. М.: ВНИИгаз, 1993. 125 с.
7. Рудаченко, А. В. Эксплуатационная надежность трубопроводных систем: учеб. пособие / А. В. Рудаченко, С. С. Байкин. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008. 118 с.
8. Дейнеко, С. В. Обеспечение надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа / С. В. Дейнеко. М.: Техника, 2011. 176 с.
9. ГОСТ 27.002–2015 Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
10. Михайлов, М. И. Надежность и диагностика технологических систем: учеб. пособие / М. И. Михайлов. Минск: РИВШ, 2022. 360 с.
11. Дерюшев, Л. Г. Нормирование требований надежности систем водоснабжения Вьетнама / Л. Г. Дерюшев, Фам Ха Хай // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 7–21.
12. ГОСТ 27.301–95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. Минск, 1995. 10 с.
13. ГОСТ Р 51901.14–2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и Булевы методы. М.: Стандартинформ, 2008. 23 с.
14. Надежность технических систем: справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин [и др.]; под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
15. Викторова, В. С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В. С. Викторова, А. С. Степанянц. М.: ЛЕНАНД, 2014. 256 с.
16. Альгин, В. Б. Расчет реальной надежности машин. Подходы ресурсной механики / В. Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. 2011. № 1 (14). С. 10–20.
17. Вопросы математической теории надежности / под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Радио и связь, 1983. 376 с.

18. Половко, А. М., Гуров, С. В. Основы теории надежности. 2-е изд., перераб. и доп / А. М. Половко, С. В. Гуров. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
19. Гуров, С. В. Надежность восстанавливаемых резервированных систем с последствием отказов / С. В. Гуров, Л. В. Уткин // Автоматика и телемеханика, 2017. № 1. С. 137–151.
20. Жаднов, В. В. Определение показателей надежности систем, обладающих вспомогательными элементами / В. В. Жаднов, С. Н. Полесский // Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем: сб. науч. тр. М.: МИЭМ, 2006. С. 151–158.
21. ГОСТ 9.602–2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2016. 87 с.
22. ГОСТ Р 51164–98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Госстандарт России, 1998. 41 с.
9. State Standard 27.002–2015. *Reliability in Technology. Terms and Definitions*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 23 (in Russian).
10. Mikhaylov M. I. (2022) *Reliability and Diagnostics of Technological Systems*. Minsk, Republican Institute for Higher Education. 360 (in Russian).
11. Deryushev L. G., Pham Ha Hai (2014) Standardization of Reliability Requirements for Water Supply Systems in Vietnam. *Vestnik MGSU*, (9), 7–21 (in Russian).
12. State Standard 27.301–95. *Reliability in Technology. Reliability Calculation. Basic Provisions*. Minsk, 1995. 10 (in Russian).
13. State Standard P 51901.14–2007. *Risk Management. Reliability Block Diagram and Boolean Methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 23 (in Russian).
14. Belyaev Yu. K., Bogatyrev V. A., Bolotin V. V. (1985) *Reliability of Technical Systems*. Moscow, Radio I Svyaz Publ. 608 (in Russian).
15. Viktorova V. S., Stepanyants A. S. (2014) *Models and Methods for Calculating the Reliability of Technical Systems*. Moscow, LENAND Publ. 256 (in Russian).
16. Algin V. B. (2011) Calculation of Real Machine Reliability. Resource Mechanics Approaches. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, (1), 10–20 (in Russian).
17. Barzilovich E. Yu., Belyaev Yu. K., Kashtanov V. A., Kovalenko I. N., Solov'ev A. D., Ushakov I. A. (1983) *Questions of Mathematical Theory of Reliability*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. 376 (in Russian).
18. Polovko A. M., Gurov S. V. (2006) *Fundamentals of Reliability Theory*. 2<sup>nd</sup> ed. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ. 704 (in Russian).
19. Gurov S. V., Utkin L. V. (2017) Reliability of Recoverable Redundant Systems with After-Effects Failures. *Automation and Remote Control*, 78, 113–124. <https://doi.org/10.1134/S000511791701009X>.
20. Zhadnov V. V., Polesky S. N. (2006) Determination of Reliability Indicators for Systems with Auxiliary Elements. *Proektirovanie Telekommunikatsionnykh i Informatsionnykh Sredstv i Sistem: Sb. Nauch. Tr.* [Design of Telecommunication and Information Means and Systems. Collection of Scientific Papers] Moscow, Moscow Institute of Electronic and Mathematics, 151–158 (in Russian).
21. State Standard 9.602–2016. *Unified System of Protection Against Corrosion and Aging. Underground Structures. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 87 (in Russian).
22. State Standard P 51164–98. *Main Steel Pipelines. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Gosstandart of Russia, 1998. 41 (in Russian)/

Поступила 22.08.2023

Подписана в печать 24.10.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

## REFERENCES

1. Tsvetkov V. Ya. (2017) Complex Technical Systems. *Obrazovatelnye Resursy i Tekhnologii = Educational Resources and Technologies*, (3), 86–92 (in Russian).
2. Rozanov B. G. (1989) *Living cover of the Earth*. Moscow, Pedagogika Publ. 128 (in Russian).
3. Hurd, W., Retterer, B. L., Meister, D., Marshik, J. A., Lancaster, Y., McClure, J., Knight, L. J. (1970) *Reliability Handbook. Vol. 3*. Moscow, Mir Publ. 376 (in Russian).
4. Zinevich A. M. (1984) *Scientific and Technical Support for the Reliability of the Construction of the Linear Part of Main Pipelines*. Moscow, Informneftegazstroy Publ. 132 (in Russian).
5. Kats L., Linkovsky Zh. (1970) *Some Issues in Studying the Reliability of VNIIEgazprom* Moscow, Express-Informatsiya Publ., (23), 15–28 (in Russian).
6. Kharionovsky V. V., Rodin V. P. (1993) Issues of Reliability and Survivability of Main Pipelines as Linear Systems. *Voprosy Nadezhnosti Gazoprovodnykh Konstruktsii: Sb. Nauch. Tr.* [Issues of Reliability of Gas Pipeline Structures: Collection of Scientific Papers]. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of Natural Gases. 125 (in Russian).
7. Rudachenko A. V., Baykin S. S. (2008) *Operational Reliability of Pipeline Systems*. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 118 (in Russian).
8. Deyneko S. V. (2011) *Ensuring the Reliability of Oil and gas Pipeline Transport Systems*. Moscow, Tekhnika Publ. 176 (in Russian).

Received: 22.08.2023

Accepted: 24.10.2023

Published online: 30.11.2023