

В
07.03.2020
Министерство
образования и науки
Донецкой Народной Республики

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи
УДК 696.2:622.691.4

Головач Юлия Александровна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ
СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2020

Работа выполнена на кафедре теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Захаров Виктор Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Медведева Оксана Николаевна,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени
Гагарина Ю.А.», профессор кафедры
теплогазоснабжения, вентиляции,
водообеспечения и прикладной
газодинамики, РФ

кандидат технических наук, доцент
Жила Виктор Андреевич,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет», профессор кафедры
теплогазоснабжения и вентиляции, РФ

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение
высшего образования Луганской Народной
Республики «Луганский государственный
университет имени В. Даля», ЛНР

Защита состоится «06» мая 2021 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина 2, зал заседаний ученого совета.

Тел. факс: +38(0623) 43-70-33, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «___» марта 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.005.01

Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных условиях развития газовой промышленности одной из важных задач является рациональное использование природного газа, что невозможно без создания системы газоснабжения, отвечающей необходимым требованиям надежности. Распределительные сети газопроводов представляют собой сложные разветвленные системы, в которых особое внимание уделяется надежности стальных подземных газопроводов как наиболее повреждаемых элементов.

Ввиду того, что распределительные системы газопроводов являются системами длительного действия, с увеличением продолжительности эксплуатации системы увеличивается и вероятность возникновения отказов.

Основным показателем надежности восстанавливаемых систем, к которым относятся системы газоснабжения, является вероятность безотказной работы. Поскольку для элементов системы газоснабжения время наработки на отказ несоизмеримо больше среднего времени ремонта, коэффициент готовности практически равен единице и не используется для оценки надежности элементов газовых сетей. В отличие от систем теплоснабжения, для которых существуют нормативные минимально допустимые показатели надежности, для систем газоснабжения такие показатели надежности отсутствуют. Вероятность безотказной работы системы определяется, главным образом, параметром потока отказов, обоснование численных значений которого, а также прогнозирование их на перспективу, невозможно без экспериментальных и статистических исследований повреждаемости подземных распределительных газопроводов, что в свою очередь требует разработки новых алгоритмов и методик расчета.

Распределительные системы газоснабжения характеризуются таким свойством, как ремонтпригодность, которое заключается в приспособленности системы к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов. Для принятия обоснованных решений касательно планирования рабочего времени и расхода необходимых технических материалов, отсутствие которых приводит к значительному увеличению времени восстановления газопровода, необходимо иметь как можно более точную картину текущего состояния аварийности газовых сетей, в частности, изменение параметра потока отказов газопроводов с течением времени. От своевременного и качественно проведенных ремонтов зависят безаварийная работа и увеличение срока службы подземных распределительных газопроводов, а изменение параметра потока отказов во времени позволяет такие ремонты спрогнозировать. Таким образом, выбранная тема диссертационных исследований является актуальной.

Степень разработанности темы. Вопросами надежности газораспределительных сетей занимались такие российские ученые как А.А. Ионин, К.С. Алибеков, В.А. Жила, С.С. Затилян, Ю.М. Белодворский, А.И. Гордюхин, П.Б. Заровный, И.С. Берсенов, И.А. Коляда, П.М. Гофман-Захаров, В.И. Глазков, Н.П. Глазов, А.М. Зиневич, Л.Б. Березин.

Исследованиям надежности газопроводов посвящены работы зарубежных авторов J. Orasheva, A.P. Teixeira, S.C. Guedes, T.A. Netto, S.F. Estefen, M.D. Pandey, M. Ahammed, R.E. Melchers, S. Zhang, W. Zhou.

Расчет вероятности возникновения отказов производится на основе определения параметра потока отказов в зависимости от характеристик участка газопровода, однако при этом не учитывается изменение параметра потока отказов с течением времени.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Исследования выполнялись в рамках кафедральной научно-исследовательской темы К 3-03-11 «Совершенствование систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха с использованием современных технологий».

Цель работы. Построение эмпирической математической модели изменения надежности стальных подземных распределительных газопроводов для повышения их эксплуатационной надежности.

Задачи исследования:

- собрать, провести систематизацию и анализ данных по аварийности подземных распределительных газопроводов г. Горловки;
- разработать алгоритм определения усредненного параметра потока отказов стальных подземных распределительных газопроводов на основе расчета периода времени, в течение которого этот параметр принимается постоянным;
- провести исследования по определению численной зависимости усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации и диаметров, а также изменения состояния металла и изоляционного покрытия стальных подземных распределительных газопроводов;
- разработать эмпирическую математическую модель изменения надежности в процессе эксплуатации, которая позволяет определять допустимый срок службы стальных подземных распределительных газопроводов;
- разработать рекомендации по повышению эксплуатационной надежности стальных подземных распределительных газопроводов на основе прогнозирования отказов в зависимости от продолжительности эксплуатации и диаметров.

Объект исследования – стальные подземные распределительные газопроводы.

Предмет исследования – эксплуатационная надежность стальных подземных распределительных газопроводов.

Научная новизна полученных результатов:

- определены численные значения параметра потока отказов стальных подземных распределительных газопроводов в зависимости от продолжительности эксплуатации, диаметра, а также состояния металла и изоляционного покрытия;
- разработана эмпирическая математическая модель изменения надежности в процессе эксплуатации в зависимости от продолжительности эксплуатации, диаметра, состояния металла и изоляционного покрытия.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость. На основании предложенного алгоритма определения усредненного параметра потока отказов стальных подземных

распределительных газопроводов с использованием расчета периода времени, в течение которого этот параметр принимается постоянным, получены:

- зависимость усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации, позволяющая прогнозировать отказы на стальных подземных распределительных газопроводах различных диаметров при различной продолжительности эксплуатации;

- зависимость усредненного параметра потока отказов от снижения пластичности металла и переходного сопротивления газопровода;

- материалы диссертационной работы включены в рабочие программы учебных дисциплин «Современные системы тепло- и газоснабжения зданий населенных мест», «Газоснабжение» для подготовки бакалавров и «Надежность систем ТГВ и пути ее повышения» для подготовки магистров по направлению «Строительство».

Практическая значимость результатов исследований:

- предложенная эмпирическая математическая модель позволяет определять допустимый срок службы стальных подземных распределительных газопроводов.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы автором был применен системный подход к анализу вопросов, связанных с надежностью стальных подземных распределительных газопроводов, математическое моделирование. В ходе выполнения расчетно-аналитических исследований использовался метод корреляционно-регрессионного анализа.

Личный вклад соискателя включает постановку цели и задач исследования, сбор, обработку и анализ статистических данных о повреждаемости подземных распределительных газопроводов, разработку алгоритма определения усредненного параметра потока отказов стальных подземных распределительных газопроводов с использованием расчета периода времени, в течение которого этот параметр принимается постоянным; определение зависимости усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации, диаметров, а также изменения состояния металла и изоляционного покрытия стальных подземных распределительных газопроводов; разработку рекомендаций по повышению эксплуатационной надежности стальных подземных распределительных газопроводов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- алгоритм определения усредненного параметра потока отказов стальных подземных распределительных газопроводов на основе расчета периода времени, в течение которого этот параметр принимается постоянным;

- эмпирическая математическая модель изменения надежности стальных подземных распределительных газопроводов в зависимости от продолжительности эксплуатации, диаметра, изменения состояния металла и изоляционного покрытия;

- алгоритм определения допустимого срока службы газопровода, который будет основой для принятия решения о ремонте или замене участка;

- методика расчета прогнозируемого количества отказов стальных подземных распределительных газопроводов в зависимости от продолжительности

эксплуатации, диаметра, изменения защитных свойств изоляционных покрытий и состояния металла газопроводов.

Степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы.

Достоверность результатов исследований подтверждается использованием основополагающих положений теории надежности, а также адекватностью результатов экспериментальных исследований. Достоверность обеспечивается также широкой публикацией работ по данной теме и обсуждением их на конференциях различного уровня.

Основные результаты диссертации докладывались на: X-XIII Международных конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка, 2011, 2012, 2013, 2014 гг.); III Международной конференции «Научно-техническое и организационно-экономическое содействие реформам в строительстве и ЖКХ» (г. Макеевка, 2012 г.); IV Республиканской научно-практической конференции (г. Бендеры, 2012 г.); II Международной научно-технической конференции «Энергетические системы» (г. Белгород, 2017 г.); I Открытой международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Энергоресурсосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений» (г. Макеевка, 2019 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, общим объемом 2,9 а.л., лично автором – 1,7 а.л., в том числе, 5 научных статей в сборниках научных трудов, включенных в перечень рецензируемых научных журналов, 1 статья в издании, индексируемом в международной наукометрической базе данных Scopus, 4 публикации по материалам конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных литературных источников и приложений. Общий объем диссертации составляет 199 страниц, из которых 144 страницы основного текста, 16 страниц списка использованных источников, 39 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность проблемы, определены цели и задачи исследования, приведены научная новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов, перечислены положения, вынесенные на защиту.

В первом разделе рассмотрено состояние проблемы повышения эксплуатационной надежности стальных подземных распределительных газопроводов, произведен анализ и выбор показателей их надежности. Ввиду того, что первичной величиной, используемой для оценки надежности газопроводов, является количество их повреждений, приводящих к утечкам, за определенный период времени, основными вероятностно-статистическими показателями

надежности газопроводов выбраны вероятность безотказной работы и параметр потока отказов. Параметр потока отказов определяется на основании статистических данных о повреждениях газопроводов, фиксируемых эксплуатирующими службами.

Собраны и систематизированы данные эксплуатации стальных подземных распределительных газопроводов г. Горловки более чем за 30 лет (за период 1978 - 2011 год). Повреждения, вследствие которых происходит утечка газа, зафиксированы на газопроводах наружным диаметром от 57 до 530 мм, имеющих срок эксплуатации от 15 до 54 лет. На стальных подземных распределительных газопроводах зафиксировано 144 повреждения. Из них 64 процента приходится на коррозионные повреждения (92 утечки), 31% – влияние горных подработок (45 утечек), 3% – механические повреждения (4 утечки) и 2% – разрыв сварного шва (3 утечки).

Очевидно, что коррозия является основной причиной отказов стальных подземных распределительных газопроводов. Частота коррозионных повреждений зависит от толщины стенки газопровода. Газопроводы с более тонкой стенкой отказывают раньше и чаще, чем газопроводы с большей толщиной металла. Толщина стенки газопровода, как правило, пропорциональна его диаметру. Учитывая отсутствие информации о толщине стенки поврежденных газопроводов при сборе статистических данных об отказах газопроводов г. Горловка и наличие связи между диаметром и толщиной стенки газопровода, в диссертационной работе рассматривалась зависимость параметра потока отказов от диаметра газопроводов. Результаты исследований, приведенные в технической литературе, не позволяют однозначно утверждать существует ли зависимость параметра потока отказов от диаметра газопроводов, также отсутствует обоснование выбора расчетного периода времени, в течение которого параметр потока отказов принимается постоянным.

На развитие коррозии подземных газопроводов влияют свойства грунта, наличие блуждающих токов. Для долговременной и надежной защиты от коррозии подземных газопроводов в условиях высокой агрессивности среды применяется одновременно защитное покрытие (в условиях города это весьма усиленная изоляция) и электрохимическая защита (катодная защита). При наличии защитного покрытия и активных методов защиты разрушение газопровода происходит из-за износа изоляции и изменения свойств металла труб вследствие изменения его структурного состояния с течением времени. Изменение защитных свойств изоляционных покрытий характеризуется изменением его переходного сопротивления, а изменение состояния металла труб – изменением его пластичности.

Существующие прогнозные модели, отражающие тенденции изменения надежности элементов системы по мере старения, позволяют определить количество повреждений на участках заданной протяженности заданного диаметра газопроводов, а также определять остаточный срок службы газопроводов по текущему состоянию металла и изоляционного покрытия, но при этом не учитывается изменение параметра потока отказов во времени, что определяет задачи исследования.

Второй раздел посвящен разработке алгоритма определения усредненного параметра потока отказов подземных распределительных газопроводов в зависимости от их диаметра и продолжительности эксплуатации.

Для обработки данных об отказах газопроводов использовалась методика регрессионного анализа.

Учитывая, что отказы газопроводов можно отнести к категории редких событий, необходимо определять параметр потока отказов за несколько лет, в течение которых он принимается постоянным. В этих целях разработан алгоритм выбора периода времени, в течение которого параметр потока отказов принимается постоянным.

Введены следующие обозначения:

i – наружный диаметр газопровода, $i = 57, 76, 89, 108, 114, 133, 159, 219, 273, 325, 426, 530$ мм;

j – период времени, в течение которого параметр потока отказов принимается постоянным, $j = 1, 10$;

k – календарный год заложения газопровода;

c – календарный год обнаружения утечки на газопроводе;

L_k – протяженность газопроводов всех диаметров k -го года заложения, м;

L_{ki} – протяженность газопроводов i -го диаметра k -го года заложения, м;

T_k – период эксплуатации газопровода k -го года заложения, на котором наблюдалось повреждение, $T_k = c - k$.

Параметр потока отказов ω_k , 1/(м·год) предлагается рассчитывать по формуле

$$\omega_k = \begin{cases} \frac{n_k}{T_k \cdot L_k}, & n' = 1; \\ \frac{\sum w_k \cdot L_k}{\sum L_k}, & n' \neq 1, \end{cases} \quad (1)$$

где n_k – количество повреждений на газопроводах k -го года заложения, на которых наблюдалось повреждение, шт., за расчетный период времени T_k , принимаемый равным 1 году;

L_k – протяженность газопроводов k -го года заложения, м;

n' – количество данных с одинаковыми значениями продолжительности эксплуатации газопровода T_k , лет, рассчитываемой по формуле

$$T_k = c - k. \quad (2)$$

Анализ статистических данных о повреждениях газопроводов за 1978-2011 год показал, что от момента принятия в эксплуатацию в течение первых 15 лет отказы не наблюдаются. Учитывая, что срок амортизации стальных газопроводов принимается равным 30 годам, параметр потока отказов за период эксплуатации от $u = 1$, соответствующего значению $T_{kmin} = 15$ лет до $u = 30$, соответствующего значению $T_k = 44$ года, при значениях $j = 1, 10$ рассчитывается по формуле

$$\omega_{ju-m;j} = \frac{1}{j} \sum_{m=0}^{j-1} \omega_{ju-m}, \quad (3)$$

где $m = 0, \overline{j-1}$, $u = 1, \overline{30}$.

Среднеарифметическое значение параметра потока отказов, рассчитанного с учетом периода времени, в течение которого данный параметр принимается постоянным j , предлагается определять по формуле

$$E_{\omega_u} = \frac{\sum_j \omega_{ju-m;j}}{\alpha}, \quad (4)$$

где α – количество вариантов выбранного периода времени, в течение которого параметр потока отказов принимается постоянным, $\alpha = 10$.

Рассчитывается среднеквадратичная погрешность результатов

$$\Delta S_{\omega} = \sqrt{\frac{\sum_u (\omega_{ju-m;j} - E_{\omega_u})^2}{(u_{\max} - 1) \cdot u_{\max}}}. \quad (5)$$

Выбирается период времени, в течение которого параметр потока отказов принимается постоянным, при условии $\Delta S_{\omega} \longrightarrow \min$.

В соответствии с предложенным алгоритмом определен период времени, в течение которого параметр потока отказов принимается постоянным, данный период равен 6 годам.

Для определения усредненного параметра потока отказов в зависимости от продолжительности эксплуатации и диаметра газопроводов принимались в расчет только коррозионные повреждения ввиду того, что с течением времени изнашивается изоляционное покрытие газопровода, меняются характеристики металла труб и увеличиваются риски развития коррозии труб.

Параметр потока отказов ω_{ki} , $1/(\text{м}\cdot\text{год})$, рассчитывается с использованием формулы (1) для каждого диаметра труб, на которых были зафиксированы утечки.

Определяется зависимость параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации газопроводов.

Расчет параметра потока отказов производится при интегральном распределении в интервале от $u = 1$, соответствующего значению $T_{k\min} = 15$ лет до $u = 30$, соответствующего значению $T_k = 44$ года с периодом времени, в течение которого параметр потока отказов принимается постоянным, 6 лет.

Усредненный параметр потока отказов ω_{ki}' , $1/(\text{м}\cdot\text{год})$, в каждом интервале рассчитывается по формуле

$$\omega_{ki}' = \frac{1}{(T_{ks} - T_{\min} + 1)} \cdot \sum_{T_{\min}}^{T_{ks}} \omega_{ki}, \quad (6)$$

где T_{ks} – максимальное значение продолжительности эксплуатации в рассматриваемом интервале;

ω_{ki} – параметр потока отказов газопроводов k -го года заложения i -го диаметра, $1/(\text{м}\cdot\text{год})$.

На основе предложенного алгоритма вычислены значения усредненного параметра потока отказов в зависимости от продолжительности эксплуатации и диаметра газопровода.

С помощью программы Curve Expert Professional получены регрессионные уравнения зависимости усредненного параметра потока отказов w_{ki} , 1/(м·год), от продолжительности эксплуатации, представленные в виде уравнения (распределение Вейбулла) для каждого диаметра газопроводов

$$\omega'_{ki} = a - be^{-cT_{kcp}^d}, \quad (7)$$

где a , b , c , d – коэффициенты уравнения регрессии;

T_{kcp} – среднее значение продолжительности эксплуатации газопровода для каждого из интервалов по 6 лет.

Коэффициенты a , b , c , d полученного уравнения регрессии, коэффициенты корреляции r и значения критерия Фишера F представлены в таблице 1.

Проверка адекватности уравнения регрессии производилась по значению критерия Фишера, определяемого как отношение общей дисперсии к остаточной, при 10%-ном уровне значимости. Табличное значение критерия Фишера $F_{(n-1;n-2;p)}^m$ составляет $F_{(4;3;10\%)}^m = 5,3427$. Поскольку фактическое значение критерия Фишера больше табличного, уравнение (7) адекватно описывает опытные точки.

Значимость коэффициентов регрессии была проверена с помощью критерия Стьюдента, с доверительной вероятностью 0,95 можно считать, что коэффициенты регрессии значимы.

Таблица 1 – Коэффициенты уравнения регрессии (7), коэффициенты корреляции и значение критерия Фишера для различных диаметров газопроводов

Наружный диаметр газопровода, мм	Количество отказов N, шт.	Коэффициенты уравнения регрессии				Коэффициент корреляции r	Критерий Фишера F
		a	b	c	d		
57	3	0,000762	0,000520	$9,23 \cdot 10^{-13}$	7,409883	0,9938	60,4
76	3	0,001508	0,001323	$4,62 \cdot 10^{-14}$	7,942866	0,9971	128,9
89	13	0,000713	0,000565	$6,61 \cdot 10^{-13}$	7,218912	0,9991	438,3
108	37	0,003900	0,003841	$2,95 \cdot 10^{-12}$	6,320064	0,9988	302,1
114	5	0,000333	0,000271	$1,38 \cdot 10^{-13}$	7,607781	0,9969	121,7
133	8	0,003963	0,003930	$1,11 \cdot 10^{-12}$	6,403757	0,9723	13,7
159	8	0,000116	0,000098	$1,34 \cdot 10^{-11}$	6,881897	0,9994	610,4
219	3	0,000055	0,000022	$2,42 \cdot 10^{-11}$	6,722438	0,9803	19,2
273	2	0,000077	0,000057	$2,19 \cdot 10^{-12}$	6,835020	0,9356	6,0
325	4	0,000028	0,000024	$2,05 \cdot 10^{-13}$	7,534468	0,9962	98,5
426	2	0,000026	0,000019	$2,15 \cdot 10^{-12}$	6,838532	0,9356	6,0
530	4	0,000026	0,000007	$3,40 \cdot 10^{-7}$	3,400748	0,9624	10,2

На рисунке 1 показано, как полученные зависимости аппроксимируют данные расчетов для газопроводов диаметров D 114, 133, 159 и 219 мм. Графики зависимости усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации для диаметра 57, 76, 89, 108, 273, 325, 426 и 530 мм приведены в диссертационной работе.

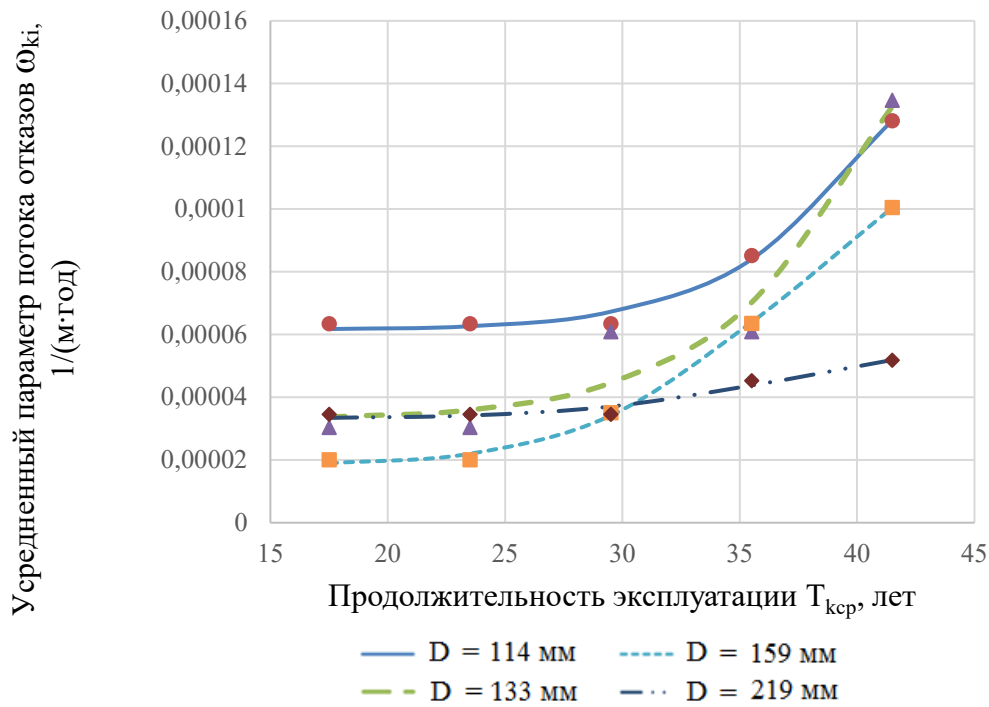


Рисунок 1 – Зависимость усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации для диаметра 114, 133, 159 и 219 мм

С увеличением продолжительности эксплуатации усредненный параметр потока отказов возрастает.

Уравнение зависимости усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации и диаметра газопроводов выводилось для двух диапазонов диаметров 57-159 мм и 219-530 мм в связи с тем, что на диаметре 219 мм меняется характер кривой.

Уравнение зависимости усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации и наружного диаметра газопроводов в диапазоне 57-159 мм имеет вид

$$\omega'_{ki} = \frac{0,000212875 - 1,395 \cdot 10^{-6} \cdot D + 7,743 \cdot 10^{-7} \cdot T_{kcp}}{1 + 0,003022549 \cdot D - 0,021561423 \cdot T_{kcp}}, \quad (8)$$

в диапазоне 219-530 мм

$$\omega'_{ki} = \frac{D \cdot T_{kcp}}{(-952018113,2 + 4706285,16 \cdot D + 2664259,62 \cdot T_{kcp})}. \quad (9)$$

На рисунке 2 показано, как полученная зависимость (8) аппроксимирует данные расчетов.

Проверка адекватности уравнений регрессии (8), (9) производилась по значению критерия Фишера. Табличное значение критерия Фишера $F_{(n-1;n-2;p)}^m$ составляет $F_{(34;32;10\%)}^T = 1,6037$ и $F_{(24;22;10\%)}^T = 1,7312$ соответственно. Фактическое значение критерия Фишера для уравнения (8) составляет 10,13, для уравнения (9) – 3,86. Поскольку фактическое значение критерия Фишера больше табличного, уравнения (8), (9) адекватно описывают опытные точки.

Значимость коэффициентов регрессии была проверена с помощью критерия Стьюдента, с доверительной вероятностью 0,95 можно считать, что коэффициенты регрессии значимы.

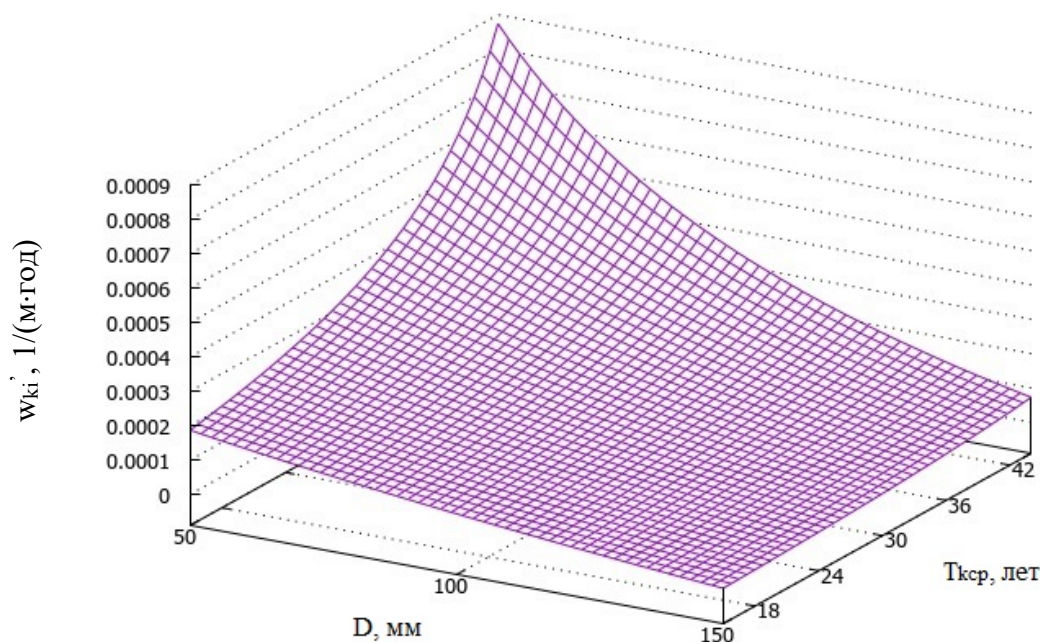


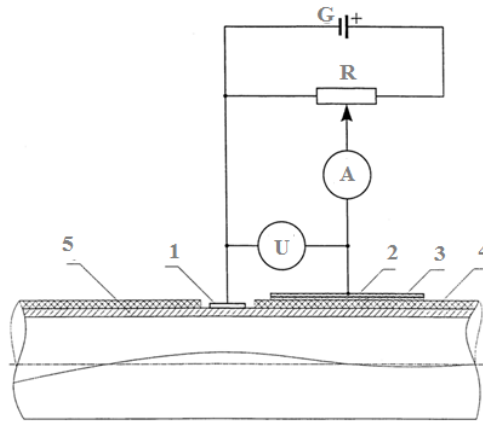
Рисунок 2 – Зависимость усредненного параметра потока отказов w_{ki}' от продолжительности эксплуатации $T_{ксп}$ и наружного диаметра газопроводов D в диапазоне диаметров 57-159 мм

Анализ зависимости усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации и диаметра газопроводов показывает, что, как правило, с увеличением диаметра усредненный параметра потока отказов уменьшается, а с увеличением продолжительности эксплуатации увеличивается. Таким образом подтверждается зависимость интенсивности отказов от коррозионного воздействия, поскольку с течением времени изоляционное покрытие стареет и его защитные свойства ослабевают.

Третий раздел посвящен исследованию изменения переходного сопротивления изоляционного покрытия газопровода от продолжительности его эксплуатации на действующих газопроводах г. Горловки.

На газопроводах наружного диаметра 108, 159, 219, 325 мм с весьма усиленной битумной изоляцией, находящихся в эксплуатации 15, 20, 25, 30, 35 и 40 лет, проведены измерения переходного сопротивления изоляционного покрытия с помощью экспериментальной установки, схема которой представлена на рисунке 3.

На изоляционное покрытие газопроводов по всей окружности накладывалось смоченное 3%-ным раствором соды (Na_2CO_3) в дистиллированной воде тканевое полотно шириной 0,3 м. Поверх устанавливался металлический электрод-бандаж шириной 0,3 м и обеспечивающий охват наружного диаметра газопровода.



G – источник питания, R – резистор, A – амперметр, U – вольтметр, 1 – механический контакт, 2 – металлический электрод-бандаж, 3 – тканевое полотно, 4 – изоляционное покрытие, 5 – газопровод

Рисунок 3 – Электрическая схема измерения переходного сопротивления изоляционного покрытия

Резистором R отбиралось от источника питания рабочее напряжение в пределах 10 - 30 В, которое контролировалось по мультиметру DT-3205A. Проводилось по 3 серии опытов для каждого из образцов.

Величина переходного сопротивления изоляции $R_{из}$, Ом·м, определялась для каждого значения измеряемой силы тока по формуле

$$R_{из} = \frac{U \cdot S}{I \cdot \pi \cdot D}, \quad (10)$$

где U – рабочее напряжение, В;

I – сила тока, А;

S – площадь металлического электрода-бандажа, м²;

D – наружный диаметр газопровода, м.

Результаты измерений для газопровода наружного диаметра 108 мм приведены в таблице 2.

Численные показатели снижения переходного сопротивления изоляционного покрытия газопроводов разных диаметров свидетельствуют об ухудшении состояния противокоррозионной изоляции. Это способствует усилению коррозии и увеличению количества отказов.

С помощью программы Curve Expert Professional получена зависимость переходного сопротивления изоляции $R_{из}$, Ом·м, от продолжительности эксплуатации T, лет, в виде регрессионного уравнения

$$R_{из} = 148810 \cdot e^{-0,127 \cdot T}. \quad (11)$$

Проверка адекватности уравнения регрессии производилась по значению критерия Фишера. Табличное значение критерия Фишера $F_{(n-1;n-2;p)}^m$ составляет $F_{(17,16,10\%)}^T = 1,9205$. Фактическое значение критерия Фишера составляет 620. Поскольку фактическое значение критерия Фишера больше табличного, уравнение (11) адекватно описывает опытные точки.

Таблица 2 – Результаты измерений переходного сопротивления изоляции газопровода наружного диаметра 108 мм

Номер испытаний	Наружный диаметр газопровода, м	Продолжительность эксплуатации Т, лет	Ширина бандажа, м	Длина бандажа, м	Площадь электрод-бандажа, м ²	Падение напряжения, В	Сила тока, А	Переходное сопротивление R _{из} , Ом·м
1 серия измерений								
1	0,108	15	0,3	0,40	0,12	15	0,00025	21000
2	0,108	20	0,3	0,40	0,12	15	0,00045	11667
3	0,108	25	0,3	0,40	0,12	15	0,00075	7000
4	0,108	30	0,3	0,40	0,12	15	0,0015	3500
5	0,108	35	0,3	0,40	0,12	15	0,0026	2019
6	0,108	40	0,3	0,40	0,12	15	0,00565	929
2 серия измерений								
7	0,108	15	0,3	0,40	0,12	20	0,0003	23333
8	0,108	20	0,3	0,40	0,12	20	0,0006	11667
9	0,108	25	0,3	0,40	0,12	20	0,00105	6667
10	0,108	30	0,3	0,40	0,12	20	0,00215	3256
11	0,108	35	0,3	0,40	0,12	20	0,004	1750
12	0,108	40	0,3	0,40	0,12	20	0,0075	933
3 серия измерений								
13	0,108	15	0,3	0,40	0,12	25	0,0004	21875
14	0,108	20	0,3	0,40	0,12	25	0,00075	11667
15	0,108	25	0,3	0,40	0,12	25	0,00145	6034
16	0,108	30	0,3	0,40	0,12	25	0,00265	3302
17	0,108	35	0,3	0,40	0,12	25	0,005	1750
18	0,108	40	0,3	0,40	0,12	25	0,0095	921

Результаты измерений и полученная зависимость (11) приведены на рисунке 4.

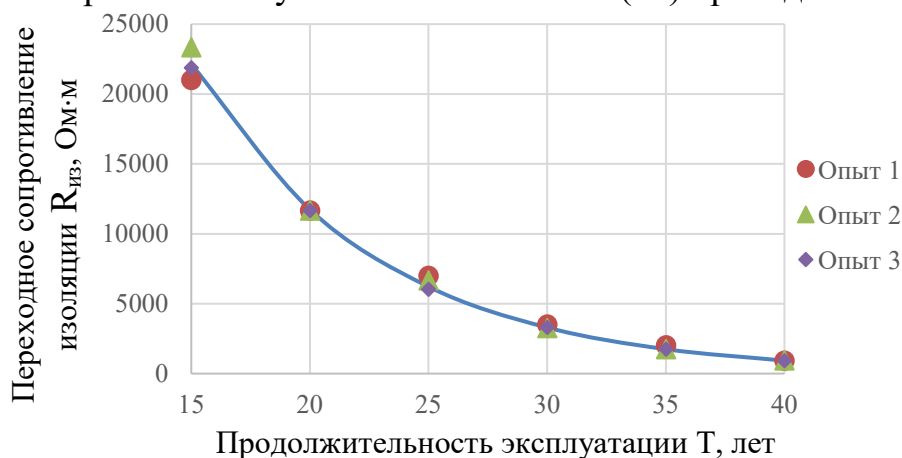


Рисунок 4 – Зависимость переходного сопротивления изоляции R_{из} от продолжительности эксплуатации газопровода Т наружного диаметра 108 мм

Аналогичные уравнения получены для диаметров 159, 219 и 325 мм и приведены в диссертационной работе.

Из графика на рисунке 4 следует, что с увеличением продолжительности эксплуатации снижается переходное сопротивление изоляции. Теперь необходимо связать переходное сопротивление изоляции и усредненный параметр потока отказов.

Значительное влияние на отказы газопроводов оказывает состояние металла труб, в частности снижение его пластичности, которое оценивается параметром ψ , выраженном в сближении величин предела текучести и временного сопротивления. Увеличение численного значения этого параметра свидетельствует о снижении пластичности и усилению коррозионного растрескивания металла.

В четвертом разделе проанализировано влияние изменения состояния металла газопровода и изоляционного покрытия подземных распределительных газопроводов на усредненный параметр потока отказов.

В диссертационной работе произведен расчет снижения пластичности металла газопроводов, на которых фиксировались повреждения, для условий г. Горловка в зависимости от продолжительности их эксплуатации и давления газа (низкого, среднего и высокого давления второй категории).

Результаты расчетов снижения пластичности металла газопроводов низкого, среднего и высокого давления второй категории в зависимости от продолжительности эксплуатации сводятся в таблицу 3. Значение продолжительности эксплуатации для получения зависимости снижения пластичности металла газопроводов от продолжительности эксплуатации принималось в диапазоне 15-54 года с шагом 6 лет.

Данные таблицы 3 показывают, что с увеличением продолжительности эксплуатации происходит снижение пластичности металла газопровода.

Таблица 3 – Снижение пластичности металла газопроводов низкого, среднего и высокого давления в зависимости от продолжительности эксплуатации

Давление газа	Значение параметра ψ при продолжительности эксплуатации Т, лет и давлении газа							
	15	21	27	33	39	45	51	54
Низкое давление (Г1) до 0,005 Па	0,6549	0,6589	0,6659	0,6757	0,6882	0,7032	0,7206	0,7302
Среднее давление (Г2) 0,005 – 0,3 МПа	0,6576	0,6763	0,6708	0,6817	0,6953	0,7115	0,7300	0,7402
Высокое давление II категории (Г3) 0,3-0,6 МПа	0,6604	0,6667	0,6759	0,6879	0,7027	0,7199	0,7396	0,7503

С помощью программы Curve Expert Professional получена зависимость параметра пластичности металла газопровода ψ (при низком давлении газа) от продолжительности эксплуатации T , лет, в виде регрессионного уравнения (Bleasdale Model)

$$\psi = (16,6 - 0,18 \cdot T)^{\frac{1}{6,11}}. \quad (12)$$

Проверка адекватности уравнения регрессии производилась по значению критерия Фишера. Табличное значение критерия Фишера $F_{(n-1;n-2;p)}^m$ составляет $F_{(7;6;10\%)}^T = 2,0145$. Фактическое значение критерия Фишера составляет 58710. Поскольку фактическое значение критерия Фишера больше табличного, уравнение (12) адекватно описывает опытные точки.

Значимость коэффициентов регрессии была проверена с помощью критерия Стьюдента, с доверительной вероятностью 0,95 можно считать, что коэффициенты регрессии значимы.

Снижение пластичности металла при максимальном значении продолжительности эксплуатации $T = 54$ года для газопроводов низкого и высокого давления второй категории не отличается более, чем на 5%, что позволяет сделать вывод о том, что давление газа до 0,6 МПа не оказывает существенного влияния на изменение пластичности металла труб.

В диссертационной работе на основании зависимости переходного сопротивления изоляции газопровода от диаметра и продолжительности его эксплуатации, которая получена в результате проведения эксперимента, производился расчет изменения величины переходного сопротивления газопровода в зависимости от продолжительности эксплуатации для газопроводов различных диаметров, результаты расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Изменение величины переходного сопротивления газопровода в зависимости от продолжительности эксплуатации

Наружный диаметр газопровода D , мм	Сопротивление растеканию тока трубопровода R_p' , Ом·м	Значение величины переходного сопротивления газопровода R_n' , Ом·м, в зависимости от продолжительности эксплуатации T , лет							
		15	21	27	33	39	45	51	54
57	156,6	41732	19561	9213	4384	2130	1077	586	450
76	156,8	31338	14710	6949	3327	1636	847	479	377
89	156,9	26784	12584	5957	2864	1420	747	432	345
108	157,0	22303	10493	4981	2409	1208	647	386	313
114	160,9	20949	9863	4689	2274	1147	621	376	308
133	161,0	17979	8477	4042	1973	1007	556	345	287
159	161,1	14614	6907	3310	1631	847	481	311	263
219	162,7	10951	5198	2513	1260	675	402	274	239
273	162,8	8843	4214	2054	1045	575	355	253	224
325	164,2	7402	3542	1741	900	508	324	239	215
426	165,4	5728	2762	1377	731	429	289	223	205
530	166,5	4638	2253	1141	621	379	266	213	198

С помощью программы Curve Expert Professional получена зависимость переходного сопротивления газопровода $R_{п}'$ от продолжительности эксплуатации T , лет, в виде регрессионного уравнения

$$R_{п}' = (a + b \cdot T)^{\frac{1}{c}} \quad (13)$$

Коэффициенты a , b , c полученных уравнений регрессии, коэффициенты корреляции r и значения критерия Фишера F представлены в таблице 5.

Проверка адекватности уравнения регрессии производилась по значению критерия Фишера. Табличное значение критерия Фишера составляет $F_{(7;6;10\%)}^T = 2,0145$. Поскольку фактическое значение критерия Фишера больше табличного, уравнение (13) адекватно описывает опытные точки.

Значимость коэффициентов регрессии была проверена с помощью критерия Стьюдента, с доверительной вероятностью 0,95 можно считать, что коэффициенты регрессии значимы.

Из анализа данных таблицы 4 следует, что с увеличением продолжительности эксплуатации снижается значение величины переходного сопротивления газопровода, причем за каждые последующие 6 лет величина переходного сопротивления уменьшается примерно вдвое.

Таблица 5 – Коэффициенты уравнения регрессии (13), коэффициенты корреляции и значение критерия Фишера для различных диаметров газопроводов

Наружный диаметр газопровода, мм	Коэффициенты уравнения регрессии			Коэффициент корреляции r	Критерий Фишера F
	a	b	c		
57	0,6735972	0,0028864	0,0312818	0,99	52375
76	0,4301105	0,0044331	0,0675985	0,99	7659
89	0,4276613	0,0044994	0,0689279	0,99	8483
108	0,4223754	0,0045868	0,0709940	0,99	9384
114	0,4175580	0,0046270	0,0723074	0,99	9660
133	0,4081062	0,0047194	0,0751414	0,99	9737
159	0,1486177	0,0048512	0,1571625	0,99	1379
219	0,1476483	0,0049602	0,1617231	0,99	1768
273	0,1786168	0,0051863	0,1496951	0,99	2753
325	0,1977863	0,0052954	0,1439708	0,99	2922
426	0,0695861	0,0043492	0,231463	0,99	1312
530	0,0550008	0,0041093	0,2544194	0,99	1209

С помощью программы Curve Expert Professional получена зависимость усредненного параметра потока отказов от снижения пластичности металла и переходного сопротивления газопровода в виде регрессионного уравнения

$$\omega = a + b\psi + cR_{п}' + d\psi^2 + eR_{п}'^2. \quad (14)$$

Коэффициенты a , b , c , d , e полученных уравнений регрессии, коэффициенты корреляции r и значения критерия Фишера F представлены в таблице 6.

Проверка адекватности уравнений регрессии производилась по значению критерия Фишера. Табличное значение критерия Фишера составляет $F_{(4;2;10)}^T = 9,2434$. Поскольку фактическое значение критерия Фишера больше табличного, уравнение (14) адекватно описывает опытные точки.

Значимость коэффициентов регрессии была проверена с помощью критерия Стьюдента, с доверительной вероятностью 0,95 можно считать, что коэффициенты регрессии значимы.

Таблица 6 – Коэффициенты уравнения регрессии (14), коэффициенты корреляции и число Фишера для различных диаметров газопроводов

Наружный диаметр газопровода, мм	Коэффициенты уравнения регрессии					Коэффициент корреляции r	Критерий Фишера F
	a	b	c	d	e		
57	-0,2009444	0,5600579	$7,974 \cdot 10^{-8}$	-0,3890025	$-1,1849 \cdot 10^{-12}$	0,99	4284
76	0,0509802	-0,1704208	$5,049 \cdot 10^{-8}$	0,1406092	$-1,1873 \cdot 10^{-12}$	0,99	44840
89	0,0509427	-0,1551632	$7,845 \cdot 10^{-9}$	0,1183689	$-2,565 \cdot 10^{-13}$	0,99	246552
108	0,1843395	-0,5400904	$-4,585 \cdot 10^{-8}$	0,3960453	$1,0339 \cdot 10^{-12}$	0,99	9579
114	0,0089636	-0,0299796	$1,374 \cdot 10^{-8}$	0,0248063	$-4,810 \cdot 10^{-13}$	0,99	30063
133	0,3063425	-0,8845181	$-1,592 \cdot 10^{-7}$	0,6390010	$5,3094 \cdot 10^{-12}$	0,99	583
159	-0,0076550	0,0188588	$1,3836 \cdot 10^{-8}$	-0,0111102	$-4,4830 \cdot 10^{-13}$	0,99	27554
219	-0,0401881	0,1145355	$4,6081 \cdot 10^{-8}$	-0,0815511	$-2,6068 \cdot 10^{-12}$	0,99	669
273	0,0387301	-0,1122264	$-3,3860 \cdot 10^{-8}$	0,0813963	$2,1102 \cdot 10^{-12}$	0,99	1308
325	-0,0004035	0,0007325	$5,851 \cdot 10^{-9}$	-0,0002025	$-5,4310 \cdot 10^{-13}$	0,99	1784
426	0,013093	-0,0379062	$-1,930 \cdot 10^{-8}$	0,0274731	$1,9204 \cdot 10^{-12}$	0,99	2053,1
530	-0,001654	0,0047614	$4,858 \cdot 10^{-9}$	-0,0033894	$-6,4840 \cdot 10^{-13}$	0,99	80

Зависимость усредненного параметра потока отказов от снижения пластичности металла и переходного сопротивления газопровода позволяет определять значение усредненного параметра потока отказов при известных значениях снижения пластичности металла и переходного сопротивления газопровода, полученных в результате расчетов для произвольного момента времени. Используя зависимости усредненного параметра потока отказов можно прогнозировать количество отказов газопроводов.

Пятый раздел посвящен разработке эмпирической математической модели изменения надежности в процессе эксплуатации, которая позволяет определять допустимый срок службы подземных распределительных газопроводов, а также разработке рекомендаций по расчету прогнозируемого количества повреждений стальных подземных распределительных газопроводов.

На основании данных о параметре потока отказов можно вычислить вероятность безотказной работы стальных подземных распределительных газопроводов разных диаметров и продолжительности эксплуатации.

Допустимый уровень надежности, рекомендуемый в качестве нормативного, для сетей среднего и высокого давления в больших и средних городах составляет 0,999, в малых городах 0,95-0,99, для сетей низкого давления – 0,9-0,99.

Расчет вероятности безотказной работы в течение года газопроводов i -го диаметра k -го года заложения, которые находились в эксплуатации T лет, производится по формуле

$$P_{ki} = e^{-\omega_{ki} \cdot L}, \quad (15)$$

где ω_{ki} – усредненный параметр потока отказов, $1/(\text{м} \cdot \text{год})$, определяемый в зависимости от продолжительности эксплуатации газопроводов i -го диаметра k -го года заложения;

L – длина участка газопровода, для которого производится расчет вероятности

безотказной работы, м.

В качестве примера приведен расчет вероятности безотказной работы участков сети низкого давления длиной 500 м по формуле (15). Минимальное значение вероятности безотказной работы принято 0,9.

Данный расчет позволил определить допустимый срок службы стальных подземных распределительных газопроводов.

Результаты расчета вероятности безотказной работы стальных подземных распределительных газопроводов низкого давления представлены на рисунке 5. Поскольку значение вероятности безотказной работы для газопроводов с наружным диаметром 159 мм и выше значительно больше уровня 0,9, было принято, что допустимый срок эксплуатации газопроводов данного диаметра составляет более 50 лет и на графике не приводится.

По результатам расчета допустимый срок службы стальных подземных распределительных газопроводов низкого давления наружного диаметра 57 мм составил 21 год, 76 мм – 28 лет, 89 мм – 33 года, 108 мм – 41 год, 114 мм – 43 года, 133 мм – приблизительно 50 лет.

Как показывают расчеты, газопроводы разных диаметров имеют разные допустимые сроки службы.

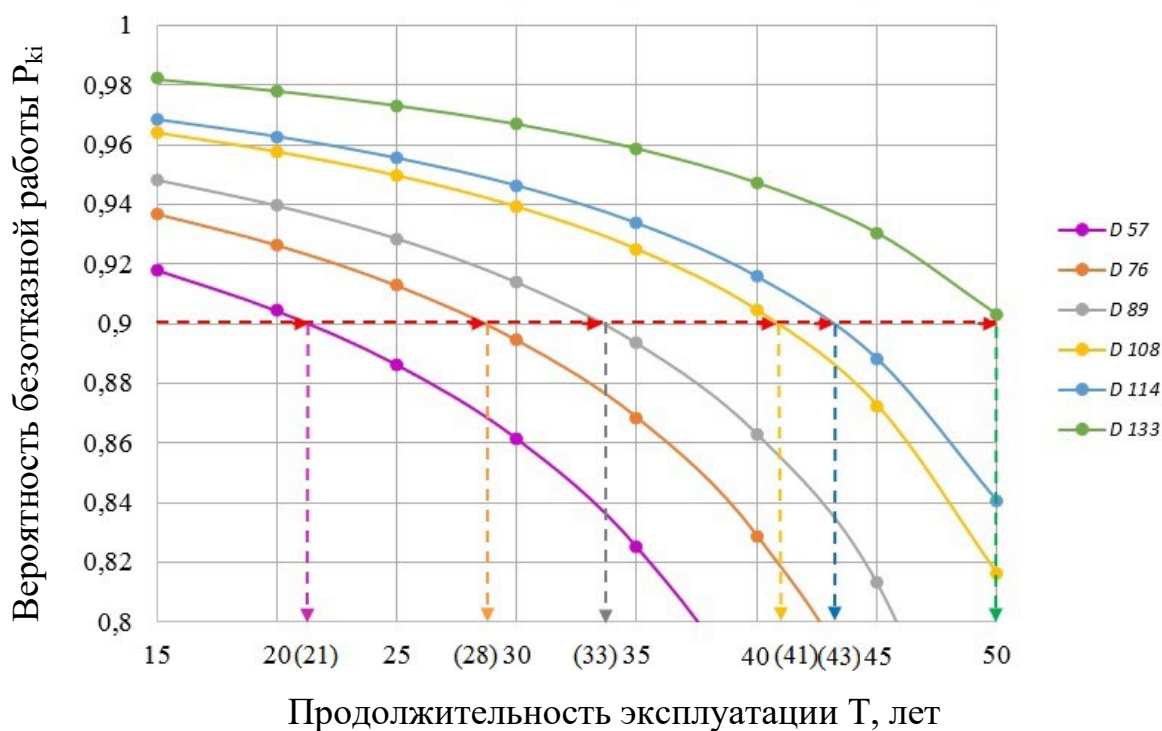


Рисунок 5 – Определение допустимого срока службы стальных подземных распределительных газопроводов

Уравнения (8), (9), (14), (15) образуют систему, которая представляет собой эмпирическую математическую модель изменения надежности стальных подземных распределительных газопроводов в процессе эксплуатации.

Для однозначного решения данного вопроса необходимо провести измерения переходного сопротивления изоляционного покрытия газопровода в ряде точек, а также определить снижение пластичности металла труб. Если переходное

сопротивление изоляционного покрытия по всей длине газопровода низко, то газопровод подлежит замене. Если переходное сопротивление изоляционного покрытия низко только на отдельных участках, производится капитальный ремонт с восстановлением изоляции или заменой газопроводов на этих участках. Снижение пластичности может быть дополнительным обоснованием для принятия решения по замене участка. Данная эмпирическая математическая модель (16) может использоваться на газопроводах других городов.

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{ki}' = (0,000212875 - 1,395 \cdot 10^{-6} \cdot D + 7,743 \cdot 10^{-7} \cdot T_{кр}) / (1 + \\ + 0,003022549 \cdot D - 0,021561423 \cdot T_{кр}) \text{ в диапазоне диаметров 57-159 мм;} \\ w_{ki}' = D \cdot T_{кр} / (-952018113,2 + 4706285,16 \cdot D + 2664259,62 \cdot T_{кр}) \\ \text{в диапазоне диаметров 219-530 м;} \\ w = a + b \cdot \psi + c R_{\Pi}' + d \cdot \psi^2 + e \cdot R_{\Pi}'^2, \text{ коэффициенты уравнения приведены} \\ \text{в таблице 6;} \\ P_{ki} = e^{-w_{ki} \cdot L}. \end{array} \right. \quad (16)$$

Превышение допустимого срока службы газопровода даже на 1 год может привести к ряду отказов с утечками газа.

С целью повышения надежности стальных подземных распределительных газопроводов разработана методика прогнозирования количества повреждений на основании полученных зависимостей усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации и диаметра газопровода.

Прогнозирование количества повреждений подземных распределительных газопроводов производится в два этапа: 1) с использованием аналитической зависимости усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации газопровода; 2) с учетом корректировки значений усредненного параметра потока отказов для диапазона, который находится за пределами аналитической зависимости (при необходимости).

Усредненный параметр потока отказов можно определить двумя методами. При известном количестве отказов газопроводов используется алгоритм определения усредненного параметра потока отказов, рассчитанного по формуле (7). При отсутствии данных о количестве повреждений усредненный параметр потока отказов вычисляется в зависимости от снижения пластичности металла и переходного сопротивления изоляции.

При выполнении первого этапа для определения количества отказов рассчитывается усредненный параметр потока отказов в зависимости от продолжительности эксплуатации и диаметра газопровода.

Рассчитывается вероятность возникновения отказа на газопроводе заданного диаметра и года заложения с использованием формулы Пуассона

$$Q_m(m) = (\omega_{ki} \cdot L_{ki})^m / m! \cdot \text{EXP}(-\omega_{ki} \cdot L_{ki}), \quad (17)$$

где ω_{ki} – усредненный параметр потока отказов газопровода i -го диаметра k -го года заложения, $1/(m \cdot \text{год})$;

L_{ki} – общая протяженность газопроводов i -го диаметра k -го года заложения, м;
 m – факториал числа m , принимается равным количеству отказов газопровода.

В первом приближении принимается $m = 1$. При значимости $p=0,9$, если $Q_m(m) < 0,1$ вероятность наступления отказа близка к нулю, следовательно, отказ на заданном диаметре газопровода заданного года заложения маловероятен. Если $Q_m(m) \geq 0,1$, принимается значение $m=1,2,3\dots$, пока условие $Q_m(m) < 0,1$ не будет выполняться.

При выполнении второго этапа производится корректировка расчета усредненного параметра потока отказов с учетом фактических появлений отказов за предыдущий год.

В качестве примера рассмотрено прогнозирование количества повреждений на газопроводах г. Горловка на 2011 год. Рассматриваются газопроводы, которые на момент прогноза (календарный год) имели срок эксплуатации свыше 15 лет. Усредненный параметр потока отказов был определен по формуле (7). Результаты прогноза на 2011 год для диапазона 15-45 лет по различным диаметрам представлены в таблице 7.

Точность прогноза определяется отношением количества совпавших данных с фактическими значениями к общему количеству данных в рассматриваемом интервале. Накопление статистических данных способствуют повышению точности прогноза, что было подтверждено расчетом с корректировкой усредненного параметра потока.

Таблица 7 – Результаты прогнозирования повреждений газопроводов г. Горловка на 2011 год

Прогноз	Наружный диаметр газопровода, м											
	57	76	89	108	114	133	159	219	273	325	426	530
	15-44 лет без корректировки расчета											
Количество совпавших данных	12	11	13	15	11	10	18	20	14	11	3	5
Общее количество данных	15	12	15	21	12	11	21	20	14	11	3	6
Точность прогноза, %	80,0	91,7	86,7	71,4	91,7	90,9	85,7	100,0	100,0	100,0	100,0	83,3
	44-54 лет без корректировки расчета											
	Количество совпавших данных	4	4	4	1	6	3	6	4	6	1	1
	Общее количество данных	8	8	10	10	7	8	8	6	6	2	1
Точность прогноза, %	50	50	40	10	85,7	37,5	75	66,7	100	50	100	100
	44-54 лет с корректировкой расчета											
	Количество совпавших данных	5	5	4	2	6	3	6	4	6	1	1
	Общее количество данных	8	8	10	10	7	8	8	6	6	2	1
Точность прогноза, %	62,5	62,5	40,0	20,0	85,7	37,5	75,0	66,7	100,0	50,0	100,0	100,0

Также было рассмотрено прогнозирование отказов с использованием расчета усредненного параметра потока отказов в зависимости от снижения пластичности металла и переходного сопротивления изоляции, были получены аналогичные результаты.

С целью повышения эксплуатационной надежности подземных распределительных газопроводов предусматриваются следующие мероприятия:

1) На газопроводах, для которых получены отказы в соответствии с прогнозом, с помощью приборов типа АНПИ, ВТР-У, ТПК-1, «КАТРИКС» без вскрытия газопровода определяются места повреждения изоляции.

2) В месте обнаружения повреждения изоляции производят шурфовой осмотр.

3) Производятся ремонтные работы изоляционного покрытия.

Данные мероприятия позволяют избежать отказа, а, следовательно, потерь газа в результате утечки.

Для оценки экономического эффекта от прогнозирования отказов подземных распределительных газопроводов в диссертационной работе был выполнен расчет расхода газа при аварийных выбросах до момента локализации поврежденного участка сети газоснабжения наружным диаметром 108 мм.

Данный расчет показал, что за 3 часа истечения газа из отверстия газопровода диаметром 108х4 мм теряется 1139,68 м³ газа. Приняв стоимость 1000 м³ газа 13168 руб., рассчитав затраты на проверку отказа на газопроводе, затраты на восстановление отказа, было определено, что верно спрогнозированный отказ на газопроводе 108х4 мм позволяет сэкономить 16704,1 руб.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе была решена научно-прикладная задача прогнозирования отказов стальных подземных распределительных газопроводов.

1. Собран, систематизирован и проанализирован статистический материал по аварийности стальных подземных распределительных газопроводов г. Горловки. Выявлено, что 64% повреждений газопроводов, вследствие которых происходят утечки газа, приходится на коррозионные повреждения.

2. Разработан алгоритм определения усредненного параметра потока отказов стальных подземных распределительных газопроводов с использованием расчета периода времени, в течение которого этот параметр принимается постоянным. Данный период времени составил 6 лет.

3. Получены зависимости усредненного параметра потока отказов в зависимости от продолжительности эксплуатации и диаметров подземных распределительных газопроводов, а также изменения состояния металла и изоляционного покрытия подземных распределительных газопроводов, которые позволяют вычислить значения усредненного параметра отказа для диаметров, для которых нет данных по результатам эксплуатации.

4. На основании найденных зависимостей усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации, диаметра, изменения состояния металла и изоляционного покрытия стальных подземных распределительных газопроводов получена эмпирическая математическая модель изменения надежности

в процессе эксплуатации, которая позволяет определять их допустимый срок службы и принимать обоснованные решения о назначении капитального ремонта или вывода газопроводов из эксплуатации. Допустимый срок службы стальных подземных распределительных газопроводов низкого давления условной длиной 500 м наружного диаметра 57 мм составил 21 год, 76 мм – 28 лет, 89 мм – 33 года, 108 мм – 41 год, 114 мм – 43 года, 133 мм – приблизительно 50 лет.

5. Разработаны рекомендации по повышению эксплуатационной надежности подземных распределительных газопроводов на основе прогнозирования отказов в зависимости от продолжительности эксплуатации и диаметров подземных распределительных газопроводов с использованием формулы Пуассона. Методика прогнозирования отказов внедрена в Макеевском управлении по газоснабжению и газификации Государственного Концерна «Донбасгаз».

6. Экономический эффект от внедрения разработанных мероприятий по повышению эксплуатационной надежности подземных распределительных газопроводов достигается за счет прогнозирования количества отказов газопроводов и определения участков, на которых возможно повреждение вследствие развития коррозии, на основе расчета усредненного параметра потока отказов, а также эффективного планирования расходов материально-технических и трудовых ресурсов. Экономия денежных средств от предотвращения одной утечки на газопроводе среднего давления диаметром 108х4 мм составляет 16704,1 руб.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Головач Ю.А. Анализ зависимости параметра потока отказов от диаметра газопроводов / В.И. Захаров, Ю.А. Головач [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2010. – Вып. 2010-6(86). – Макеевка, С.117-122. *(проанализировано влияние диаметра газопровода на значение параметра потока отказов)*.

2. Головач Ю.А. Определение показателей надежности работы распределительных газопроводов / В.И. Захаров, Ю.А. Головач [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2011. – Вып. 2011-5(91). – Макеевка, С.43-49. *(выполнен анализ влияния зависимости параметра потока отказов от диаметра газопровода на значение показателя надежности - вероятности безотказной работы)*.

3. Головач Ю.А. Определение основных показателей надежности при проектировании газовых сетей / В.И. Захаров, Ю.А. Головач [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Инженерные системы и техногенная безопасность». – Вып. 2012-2(94). – Макеевка, С.84-90. *(выполнен расчет показателей надежности тупиковой газовой сети для различных расчетных периодов времени и сравнение их с нормативными)*.

4. Головач Ю.А. Анализ методик расчета показателей надежности и нормативных данных при проектировании газовых сетей / В.И. Захаров,

Ю.А. Головач [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Здания и конструкции с использованием новых материалов и технологий». – 2012. – Вып. 2012-3(95). – Макеевка, С.78-80. *(на основе расчета показателей надежности тупиковой газовой сети проанализировано влияние расчетного периода времени на значение показателя надежности и вероятности безотказной работы).*

5. Головач Ю.А. Расчет надежности тупиковой газовой сети / В.И. Захаров, Ю.А. Головач [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Научное методическое, практическое обеспечение градостроительства территориального стратегического планирования». – 2014. – Вып. 2014-3(107). – Макеевка, С.13-19. *(получены значения удельного параметра потока отказа в зависимости от диаметра газопроводов на основании статистических данных, произведено сравнение вероятности безотказной работы, определенной с учетом зависимостей параметра потока отказов от диаметров газопроводов, полученных по исходным данным из технической литературы и статистическим данным для тупиковой газовой сети).*

– публикации в зарубежных журналах, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS:

6. Yu A Golovach. Method development of the integral specific failure rate determination considering time in service and diameter of gas pipelines / Yu A Golovach and N V Kornilova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 791 (2020). IV International Scientific and Technical Conference “Energy Systems” IOP Conf. Series. *(разработана методика по выбору оптимального шага продолжительности эксплуатации подземных распределительных газопроводов при определении параметра потока отказов, проанализирована зависимость усредненного параметра потока отказов в зависимости от диаметра и продолжительности эксплуатации).*

– публикации в других изданиях:

7. Головач Ю.А. Анализ влияния диаметров и толщин стенок трубопроводов на вероятность безотказной работы газовых сетей / В.И. Захаров, Ю.А. Головач // Энергетические системы: сборник трудов II Международной научно-технической конференции БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 23-24 ноября 2017). – Белгород: БГТУ, 2017. – С.28-34. *(проанализировано влияние диаметра и толщины стенки газопровода на значение параметра потока отказов).*

8. Головач Ю.А. Проектирование газовых сетей с учетом требований надежности / Ю.А. Головач // Научно-техническое и организационно-экономическое содействие реформам в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве: сборник тезисов докладов III Международной конференции. – Макеевка, 2012. – С.122-125.

9. Головач Ю.А. Определение вероятности безотказной работы кольцевых газовых сетей / В.И. Захаров, Ю.А. Головач // Строительство – как фактор формирования комфортной среды жизнедеятельности: материалы IV Республиканской научно-практической конференции (с международным участием) (Бендеры, 19 октября 2012). – Бендеры: БПФ ПГУ им. Т.Г. Шевченко, 2012. –

С.103-108. *(выполнено сравнение показателей надежности кольцевой резервированной и нерезервированной сети).*

10. Головач Ю.А. Влияние продолжительности эксплуатации и диаметров газопроводов на показатели надёжности газораспределительных сетей / Ю.А. Головач // Энергоресурсосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений: электронный сборник научных трудов I открытой международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов (Макеевка, 26 декабря 2019). – Макеевка: ДонНАСА, 2020. – С.123-127.

АННОТАЦИЯ

Головач Юлия Александровна. Повышение эксплуатационной надежности распределительных газопроводов на основе статистического анализа. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Макеевка, 2020 г.

Работа посвящена разработке эмпирической математической модели изменения надежности стальных подземных распределительных газопроводов для повышения их эксплуатационной надежности.

Собраны, систематизированы и проанализированы статистические данные о повреждениях стальных подземных распределительных газопроводов г. Горловка за период 1978 – 2011 год. Выявлены основные причины повреждений газопроводов. Разработан алгоритм определения усредненного параметра потока отказов подземных распределительных газопроводов в зависимости от их диаметра и продолжительности эксплуатации с расчетом периода времени, в течение которого он принимается постоянным на основании данных о количестве повреждений на различных диаметрах труб. Получены зависимости усредненного параметра потока отказов от продолжительности эксплуатации и диаметра газопроводов. Исследовано влияние изменения состояния металла газопровода и изоляционного покрытия подземных распределительных газопроводов на усредненный параметр потока отказов. Установлено, что давление газа до 0,6 МПа не оказывает существенного влияния на изменение состояния металла труб. Разработана эмпирическая математическая модель изменения надежности в процессе эксплуатации, которая позволяет назначать допустимый срок службы и капитальных ремонтов стальных подземных распределительных газопроводов на основании расчета вероятности безотказной работы с учетом усредненного параметра потока отказов. Разработаны рекомендации по расчету прогнозируемого количества повреждений стальных подземных распределительных газопроводов с целью предотвращения утечек газа.

Ключевые слова: эксплуатационная надежность, утечка газа, подземные распределительные газопроводы, вероятность безотказной работы, параметр потока отказов, изоляционное покрытие, эмпирическая математическая модель.

ANNOTATION

Golovach Yulia. Improving the operational reliability of gas distribution pipelines based on statistical analysis. - On the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical Sciences in the specialty 05.23.03-heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting. - Donbass national Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2020.

The work is devoted to the development of an empirical mathematical model for changing the reliability of steel underground gas distribution pipelines to improve their operational reliability.

Statistical data on damage to steel underground gas distribution pipelines in Gorlovka for the period 1978-2011 are collected, systematized and analyzed. The main causes of damage to gas pipelines have been identified. An algorithm for determining the average failure flow parameter of underground distribution gas pipelines depending on their diameter and duration of operation with the calculation of the time period during which it is assumed to be constant based on data on the number of damages on different pipe diameters has been developed. The dependences of the averaged failure flow parameter on the duration of operation and the diameter of gas pipelines are obtained. The influence of changes in the state of the gas pipeline metal and the insulation coating of underground distribution pipelines on the average parameter of the failure flow is studied. It is established that the gas pressure up to 0.6 MPa does not significantly affect the change in the state of the pipe metal. An empirical mathematical model of reliability changes during operation, which makes it possible to assign the permissible service life and major repairs of steel underground gas distribution pipelines based on the calculation of the probability of failure-free operation, taking into account the average failure flow parameter, has been developed. Recommendations for calculating the predicted amount of damage to steel underground gas distribution pipelines in order to prevent gas leaks have been developed.

Keywords: operational reliability, gas leakage, underground gas distribution pipelines, probability of failure-free operation, failure flow parameter, insulation coating, empirical mathematical model.