ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

____

Руководитель программы
аспирантуры
профессор А.М. Щипачёв

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Подготовка научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

Область науки:	2. Технические науки
Группа научных специальностей:	2.8. Недропользование и горные науки
Научная специальность:	2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ
Отрасли науки:	Технические
Форма освоения программы аспирантуры:	Очная
Срок освоения программы аспирантуры:	4 года
Составители:	Профессор А.М. Щипачев

Санкт-Петербург

Содержание

Введение

Математические методы теории надежности основываются на использовании теорий вероятностей, математической статистики, массового обслуживания, случайных процессов, теории графов, методов оптимизации и других.

Появление статистических программных систем и пакетов значительно облегчают построение моделей надежности объектов магистральных трубопроводов. В настоящее время разработаны ряд программных приложений в виде набора статистических алгоритмов для решения научных и инженерных задач по обработки статистических данных и методам построения моделей надежности.

Оценка надежности эксплуатируемых нефтегазопроводов основывается на статистических методах оценки показателей безотказной работы магистральных нефтегазопроводов. Объектом исследования выступает линейная часть магистрального трубопровода. Для линейной части трубопровода полностью исключается возможность постановки на испытание серии однотипных объектов, как, например, это возможно для секции трубопровода еще не уложенной в грунт. Данное обстоятельство обуславливает невозможность проведения планирования эксперимента. Поэтому очень усложняется использование вероятностно-статистических методов оценки надёжности линейной части магистральных трубопроводов. Поскольку для эксплуатируемых трубопроводов получают оценки надёжности на основе статистики имеющихся отказов, вначале допускают аварийные ситуации, а потом оценивают надёжность.

Особенностью определения надёжности нефтегазопроводов является недостаток первичных данных, что не позволяет получить исходную информацию в полном объёме. Поэтому возникает необходимость в разработке модели и принятии решений в условиях различной степени полноты информации о надёжности элементов трубопроводов.

1 Определение количественных характеристик надежности по статистическим данным об отказах изделия.

1.1 Теоретические сведения

Статистическая оценка вероятности безотказной работы:

$$\hat{P}(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (1.1)$$

где $n(t)$ – число изделий, отказавших к моменту времени t;N –общее число ТО; $N - n(t)$ – число не отказавших технологических объектов.

Статистическая оценка вероятности отказа:

$$\hat{q}(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (1.2)$$

где $n(t)$ – число ТО, отказавших к моменту времени *t*.

Статическая оценка частоты отказов (относительная частота) определяется выражением:

$$\hat{f}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (1.3)$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших ТО на интервале Δt; Δt – интервал времени. $\Delta t : \left(t - \frac{\Delta t}{2}; t + \frac{\Delta t}{2} \right)$; *N*– число объектов в начальный момент времени.

Статистическая оценка интенсивности отказов:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}, \quad (1.4)$$

где $N(t)$ – число исправно работающих объектов на момент времени *t* или среднее число исправно работающих объектов за Δt.

Среднее число исправно работающих объектов за Δt:

$$N_{ср} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}, \quad (1.5)$$

где N_i – число ТО, исправно работающих в начале интервала; N_{i+1} – число ТО, исправно работающих в конце интервала.

Среднее время безотказной работы по статистическим данным изделия оценивается выражением:

$$m_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} t_i, \quad (1.6)$$

где t_i – время безотказной работы *i*-го ТО; *N* – общее число ТО, поставленных на испытания.

При разбиении *t* на интервалы, *i* =1; *m*:

$$m_t \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{m} n_i \cdot t_{ср\,i}, \quad (1.7)$$

где n_i - количество вышедших из строя ТО в *i*-ом интервале времени; $t_{ср\,i}$ - среднее время интервала.

Среднее время интервала:

$$t_{ср\,i} = \frac{t_i + t_{i+1}}{2}, \quad (1.8)$$

где t_i -время начала *i*-го интервала; t_{i+1} -время конца*i*-го интервала.

Статистическая оценка дисперсии времени безотказной работы ТО определяется формулой:

$$D_t^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (t_i - m_t^*)^2, \quad (1.9)$$

1.2 Решение типовых задач

Задача 1. На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп, за 3000 час.отказало 80 ламп. Требуется определить $\hat{P}(t),\ \hat{q}(t)$ при t = 3000 час.

Решение. В данном случае N= 1000; $n(t)$ = 80; $N-n(t)=$1000-80=920. По формулам (1.1) и (1.2) определяем:

$$\hat{P}(3000)=\frac{920}{1000}=0{,}92,$$

$$\hat{q}(3000)=\frac{80}{1000}=0{,}08$$

или $\hat{q}(3000)=1-\hat{P}(3000)=1-0{,}92=0{,}08.$

Задача 2.На испытание было поставлено 1000 однотипных ламп. За первые 3000 час.отказало 80 ламп, а за интервал времени 2500 ÷ 3500 час. отказало 50 ламп. Требуется определить статистическую оценку частоты и интенсивности отказов ламп $\hat{f}(3000)$ и $\hat{\lambda}(3000)$.

Решение. В данном случае N=1000; t=3000 час; Δt =1000 час.

По формулам (1.3) и (1.4) находим:

$$\hat{f}(t)=\hat{f}(3000)=\frac{50}{1000\cdot 1000}=5\cdot 10^{-5}\ 1/\text{час},$$

$$\hat{\lambda}(t)=\hat{\lambda}(3000)=\frac{100}{1000\cdot 920}=5{,}4\cdot 10^{-5}\ 1/\text{час}.$$

Задача 3.На испытание поставлено N = 400 изделий. За время t = 3000 час отказало 200 изделий. За интервал времени Δt =100 час, отказало 100 изделий. Требуется определить $\hat{P}(3000)$, $\hat{P}(3100)$, $\hat{f}(3000)$, $\hat{\lambda}(3000)$.

Решение. По формуле (1.1) находим:

$$\hat{P}(3000)=\frac{200}{400}=0{,}5$$

$$\hat{P}(3100)=\frac{(400-300)}{400}=0{,}25\,.$$

Используя формулы (1.3) и (1.4), получим:

$$\hat{f}(t)=\hat{f}(3000)=\frac{100}{100\cdot 400}=2{,}5\cdot 10^{-3}\ 1/\text{час}$$

$$\hat{\lambda}(t)=\hat{\lambda}(3000)=\frac{100}{100\cdot(400-200)}=5\cdot 10^{-3}\,1/\text{час}.$$

Задача 4.На испытание поставлено 6 однотипных изделий. Получены следующие значения t_i (t_i - время безотказной работы i- го изделия): t_1 =280 час; t_2 = 350 час; t_3 =400 час; t_4 =320 час; t_5 =380 час; t_6 =330 час.

Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

Решение.По формуле (1.6) имеем:

$$m_t^*=\frac{280+350+400+320+380+330}{6}=\frac{2060}{6}=343{,}3\,\text{час}.$$

Задача 5.За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зафиксировано 7 отказов. Время восстановления составило:

t_1=12мин.; t_2 =23мин.; t_3=15мин.; t_4 =9мин.; t_5=17мин.; t_6 =28мин.; t_7 =25мин.; t_8 =31мин.

Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры m_{te}^*.

Решение.

$$m_{te}^{*} = \frac{12+23+15+9+17+28+25+31}{8} = \frac{160}{8} = 20 \text{ мин.}$$

Задача 6. В результате наблюдения за 45 образцами радиоэлектронного оборудования получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенные в табл.1.1. Требуется определить m_e^*.

Таблица 1.1 - Данные образцов до первого отказа

t_i, час	n_i	t_i, час	n_i	t_i, час	n_i
0-5	1	30-35	4	60-65	3
5-10	5	35-40	3	65-70	3
10-15	8	40-45	0	70-75	3
15-20	2	45-50	1	75-80	1
20-25	5	50-55	0		
25-30	6	55-60	0		

Решение. В данном случае:

$$t_{cp1} = 2{,}5; t_{cp2} = 7{,}5; t_{cp3} = 12{,}5; t_{cp4} = 17{,}5; t_{cp5} = 22{,}5; t_{cp6} = 27{,}5;$$
$$t_{cp7} = 32{,}5; t_{cp8} = 37{,}5; t_{cp9} = 42{,}5; t_{cp10} = 47{,}5; t_{cp11} = 52{,}5; t_{cp12} = 57{,}5;$$
$$t_{cp13} = 62{,}5; t_{cp14} = 67{,}5; t_{cp15} = 72{,}5; t_{cp16} = 77{,}5, N = 45, m = 16.$$

Используя формулу (1.7), получим:

$$m_t^* \approx \frac{1\cdot 2{,}5 + 5\cdot 7{,}5 + 8\cdot 12{,}5 + 2\cdot 17{,}5 + 5\cdot 22{,}5 + 6\cdot 27{,}5 + 4\cdot 32{,}5 + 3\cdot 37{,}5 +}{45}$$
$$\frac{+\,0\cdot 42{,}5 + 1\cdot 47{,}5 + 0\cdot 52{,}5 + 0\cdot 57{,}5 + 3\cdot 62{,}5 + 3\cdot 67{,}5 + 3\cdot 72{,}5 + 1\cdot 77{,}5}{} =$$
$$= \frac{1427{,}5}{45} = 31{,}7.$$

1.3 Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 час. отказало 50 изделий. За интервал времени 4000 - 4100 час. отказало ещё 20 изделий. Требуется определить $\hat{f}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$ при t=4000 час.

Задача 2. На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 час. отказало 50 изделий. Требуется определить $\hat{P}(t)$ и $\hat{q}(t)$ при t=4000 час.

Задача 3. В течение 1000 час из 10 гироскопов отказало 2. За интервал времени 1000 - 1100 час.отказал еще один гироскоп. Требуется определить $\hat{f}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$ при t =1000 час.

Задача 4. На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За первые 3000 час.отказало 80 ламп. За интервал времени 3000 - 4000 час. отказало еще 50 ламп. Требуется определить $\hat{P}(t)$ и $\hat{q}(t)$ при t=4000 час.

Задача 5. На испытание поставлено 1000 изделий. За время t=1300 час. вышло из строя 288 штук изделий. За последующий интервал времени 1300-1400 час. вышло из строя еще 13 изделий. Необходимо вычислить $\hat{P}(t)$ при t=1300час. и t=1400 час.; $\hat{f}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$ при t =1300 час.

Задача 6. На испытание поставлено 45 изделий. За время t=60 час. вышло из строя 35 штук изделий. За последующий интервал времени 60-65 час. вышло из строя еще 3 изделия. Необходимо вычислить $\hat{P}(t)$ при t=60час. и t=65 час.; $\hat{f}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$ при t =60 час.

Задача 7. В результате наблюдения за 45 образцами радиоэлектронного оборудования, которые прошли предварительную 80-часовую приработку, получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенные в табл.1.2. Необходимо определить m_t^*.

Таблица 1.2 - Данные образцов до первого отказа

t_i, час	n_i
0-10	19
10-20	13
20-30	8
30-40	3
40-50	0
50-60	1
60-70	1

Задача 8. На испытание поставлено 8 однотипных изделий. Получены следующие значения t_i (t_i - время безотказной работы *i*-го изделия):
t_1 =560час.; t_2 =700час.; t_3 =800час.; t_4 =650час.; t_5 =580час.; t_6 =760час.; t_7 =920час.; t_8 =850час.
Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

Задача 9. За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зарегистрировано 6 отказов. Время восстановления составило: t_1 =15мин.; t_2 =20мин.; t_3 =10мин.; t_4 =28мин.; t_5 =22мин.; t_6 =30мин.

Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры m^*_{te}.

Задача 10. На испытание поставлено 1000 изделий. За время *t*=11000 час. вышло из строя 410 изделий. За последующий интервал времени 11000-12000 час. вышло из строя еще 40 изделий. Необходимо вычислить $\hat{P}(t)$ при *t*=11000 час. и *t*=12000 час., а также $\hat{f}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$ при *t*=11000 час.

2 Расчет вероятности отказа стенки трубы магистрального трубопровода

2.1 Теоретические сведения

При анализе надежности линейной части трубопроводов безотказность стенки трубы определяется по вероятности отказа при известных законах распределения случайных величин. Случайными величинами являются параметры нагрузки и параметры прочности.

Для вновь построенных и введенных в эксплуатацию трубопроводов принимается нормальный закон распределения случайных величин.

Цель расчета: определение вероятности отказа стенки трубы прямолинейного участка магистрального трубопровода из-за достижения средними значениями продольных суммарных напряжений в стенке трубы средних значений временного сопротивления стали трубы и исчерпания резерва прочности.

1. Обозначение расчетных параметров как характеристик случайных величин:

$\tilde{R}_I^{н}$ – случайное значение нормативного сопротивления стали, МПа;

$\tilde{R}_I$ – случайное значение расчетного сопротивления стали, МПа;

$\bar{R}_I$ – математическое ожидание значения расчетного сопротивления стали, МПа;

$\bar{\psi}_I$ – математическое ожидание коэффициента, учитывающего двухосное напряженное состояние металла трубы;

$\tilde{\psi}_I$ – случайное значение коэффициента, учитывающего двухосное напряженное состояние металла трубы;

$\tilde{R}$ – обобщенное обозначение случайных значений любого параметра прочности;

$\tilde{Q}$ – обобщенное обозначение случайных значений любого параметра нагрузки;

$\Delta\tilde{t}$ – перепад температуры, ºС;

$\tilde{p}$ – рабочее давление, МПа;

$\Delta\bar{t}$ – математическое ожидание величины перепада температуры, ºС;

$\bar{p}$ – математическое ожидание величины рабочего давления, МПа;

$\bar{\sigma}_{пр.N}$ – математическое ожидание значений расчетных продольных напряжений, МПа;

S – запас прочности, МПа;

$\breve{Q}$, $\breve{R}$ – дисперсии параметров нагрузки и прочности, МПа^2;

$\hat{S}$ – стандартные отклонения случайных значений запаса прочности, МПа;

$\breve{S}$ – дисперсия запаса прочности, МПа^2.

Исходные данные

Приведены в приложении 1.

Определение проектной толщины стенки трубы параметров прочности и нагрузки

1) Случайные значения расчетного сопротивления стали трубы:

$$\tilde{R}_I = \frac{\tilde{R}_I^{н} \cdot m}{k_I \cdot k_н},$$

где m– коэффициент условий работы, зависящий от категории участка и определяемый по СП 1.333-2015(для Iи II категории равен 0,75);

k_I – коэффициент надежности по материалу, зависящий от материала труб(от 1,34 до 1,55);

$k_н$ – коэффициент надежности по назначению трубопровода, при диаметре трубопровода (до 1000 мм – 1, более 1000– 1,05).

2) Математические ожидания давления, температурного перепада и расчетного сопротивления стали:

$$\overline{R}_{\text{I}} = \frac{\sum_{I}^{k} \tilde{R}_I}{k};\ \Delta\bar{t} = \frac{\sum_{I}^{k} \Delta\tilde{t}}{k};\ \bar{p} = \frac{\sum_{I}^{k} \tilde{p}}{k}, \qquad (2.1)$$

где k – число случайных значений $\tilde{p}$ и $\Delta\tilde{t}$.

3) Предварительное значение расчетной толщины стенки без учета осевых сжимающих напряжений:

$$\delta_1 = \frac{n\bar{p}D_н}{2(\overline{R}_1 + n\bar{p})}, \qquad (2.2)$$

где n – коэффициент надежности по нагрузке – рабочему давлению, округляется в соответствии с СП 33.13330.2012;$D_н$– номинальный диаметр трубы.

Полученное расчетное значение толщины стенки округляется в соответствии с инструкцией по применению стальных труб в нефтяной и газовой промышленности до ближайшего номинального $\delta_н$. При расчете вероятности отказов трубопроводов, находящихся в эксплуатации и имеющих общий коррозионный износ стенки, толщина стенки определяется статистической обработкой результатов измерений остаточной толщины при диагностике как среднеквадратическая величина.

4) Математическое ожидание продольных осевых напряжений по математическим ожиданиям температурного перепада $\Delta\bar{t}$ и рабочего давления $\bar{p}$:

$$\overline{\sigma}_{прN} = \mu\frac{n\bar{p}D_{вн}}{2\cdot\delta_н} - \alpha E\Delta\bar{t}, \qquad (2.3)$$

где $\alpha = 10^{-5}$ град$^{-1}$ – коэффициент линейного расширения металла трубы; $\mu = 0{,}3$ – коэффициент Пуассона; $E = 2\cdot10^{11}$ – модуль упругости стали, Па.

5) В случае если $\overline{\sigma}_{прN} > 0$, то напряжения будут растягивающими, и предварительно определенное номинальное значение $\delta_н$ для дальнейших расчетов принимается без изменений.

Если $\overline{\sigma}_{прN} < 0$, то продольные напряжения будут сжимающими, и тогда необходимо уточнить толщину стенки из условия:

$$\delta = \frac{n\bar{p}D_н}{2(\overline{R}_1\overline{\psi}_1 + n\bar{p})}, \qquad (2.4)$$

где $D_н$– номинальный диаметр трубы;$\overline{\psi}_1$– математическое ожидание коэффициента, учитывающего двухосное напряженное состояние металла трубы:

$$\overline{\psi}_1 = \sqrt{1 - 0{,}75\left(\frac{|\overline{\sigma}_{пр.N}|}{\overline{R}_1}\right)^2} - 0{,}5\frac{|\overline{\sigma}_{пр.N}|}{\overline{R}_1}. \qquad (2.5)$$

После этого уточненное значение стенки округляется в большую сторону до имеющего по сортаменту номинального значения или до 0,1 мм, которое и используется в дальнейших расчетах.

6) Случайные значения и математическое ожидание кольцевых напряжений по уточненной толщине стенки.

$$\tilde{\sigma}_{кц} = \frac{n\tilde{p}D_{вн}}{2\delta}; \qquad (2.6)$$

$$\overline{\sigma}_{кц} = \frac{\sum_{1}^{k}\tilde{\sigma}_{кц}}{k}. \qquad (2.7)$$

7) Случайные значения и математическое ожидание продольных напряжений для уточненной толщины стенки:

$$\tilde{\sigma}_{прN} = \mu\frac{n\tilde{p}D_{вн}}{2\delta} - \alpha E\Delta\tilde{t}; \qquad (2.8)$$

$$\overline{\sigma}_{пр.N} = \frac{\sum_{1}^{k}\tilde{\sigma}_{пр.N}}{k}. \qquad (2.9)$$

8) Случайные значения и математическое ожидание интенсивности напряжений:

$$\tilde{\sigma}_i = \sqrt{\tilde{\sigma}_{кц}{}^2 - \tilde{\sigma}_{кц} \cdot \tilde{\sigma}_{пр.N} + \tilde{\sigma}_{пр.N}{}^2}; \qquad (2.10)$$

$$\bar{\sigma}_i = \sqrt{\bar{\sigma}_{кц}{}^2 - \bar{\sigma}_{кц} \cdot \bar{\sigma}_{пр.N} + \bar{\sigma}_{пр.N}{}^2}. \qquad (2.11)$$

9)Математические ожидание кольцевых напряжений $\bar{\sigma}_{кц}$, продольных $\bar{\sigma}_{пр.N}$ и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ сравниваются между собой, наибольшее из них принимается за параметр нагрузки с математическим ожиданием $\bar{Q}$ и соответствующими случайными значениями $\tilde{Q}$.

$$\bar{Q} = \max\{\bar{\sigma}_{кц}; \bar{\sigma}_{пр.N}; \bar{\sigma}_i\}, \qquad (2.12)$$

где $\tilde{Q}$ принимается равным соответствующему выбранному

$$\bar{Q} = \{\tilde{\sigma}_{кц}; \tilde{\sigma}_{пр.N}; \tilde{\sigma}_i\}. \qquad (2.13)$$

10) Случайные значения параметров прочности:

$$\tilde{R} = \tilde{\psi}_1 \cdot \tilde{R}_1, \qquad (2.14)$$

где $\tilde{\psi}_1 = \sqrt{1 - 0{,}75\left(\dfrac{\tilde{\sigma}_{кц}}{\tilde{R}_1}\right)^2} - 0{,}5\dfrac{\tilde{\sigma}_{кц}}{\tilde{R}_1}$,

где $\tilde{\sigma}_{кц}$ – случайные значения кольцевых напряжений: $\tilde{\sigma}_{кц} = \dfrac{n\tilde{p}D_{вн}}{2\delta}$.

Определение вероятности отказа

1) Математические ожидания параметров нагрузки, параметров прочности и запаса прочности:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_1^k \tilde{Q}}{k}$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_1^k \tilde{R}}{k} \qquad (2.15)$$

$$\bar{S} = \bar{R} - \bar{Q}$$

2) Предположим, что при эксплуатации случайные механические повреждения и повреждения от коррозии устранялись своевременно. Тогда, пренебрегаем на первом этапе старением металла трубы, считая, что случайные величины подчиняются нормальным законам распределения и вычисляются дисперсией параметров нагрузки и прочности:

$$\breve{Q} = \frac{\sum_1^k (\tilde{Q} + \bar{Q})^2}{k};$$

$$\breve{R} = \frac{\sum_1^k (\tilde{R} + \bar{R})^2}{k}. \qquad (2.16)$$

3) Среднее квадратичное отклонение случайных значений запаса прочности:

$$\hat{S} = \sqrt{\breve{S}} = \sqrt{\breve{R} + \breve{Q}} \qquad (2.16)$$

4) Характеристики безопасности при нормальном законе распределения:

$$\gamma = \frac{\bar{S}}{\hat{S}} \qquad (2.17)$$

5) По таблице нормированных функцийЛапласа определяется величина интеграла вероятностей Гаусса $\Phi(\gamma)$ для вычисленного значения параметра безопасности.

6) Вероятность отказа для нормального закона распределения случайных величин:

$$P = \frac{1}{2} - \Phi(\gamma) \qquad (2.18)$$

7) Проверяем условие $P \le P_{доп}$.

8) В случае невыполнения условий производится анализ хода расчета по формулам, разрабатывается предложение для снижения вероятности отказа.

2.2Решение типовых задач

Условия задачи:

Нефть, I;

D=1220 мм;

$\tilde{p}$ =3,4; 2,9; 3,2; 4; 3,0 МПа;

$\Delta\tilde{t}$ =-20; 22; 21; 23; 19 ºС;

$\tilde{R}_1^н$ =780; 699; 891; 789; 764 МПа;

$V_{доп} = 0{,}05$;

Марка стали: 17Г1С-У термоупрочненная.

Решение.

Определение проектной толщины стенки трубы, параметров прочности и нагрузки:

1. $\tilde{R}_1 = \dfrac{\tilde{R}_1^н \cdot m}{k_1 \cdot k_н}$, m = 0,75, $\text{k}_1 = 1{,}45$, $\text{k}_н = 1{,}05$;

$$\tilde{R}_1 = \frac{780 \cdot 0{,}75}{1{,}45 \cdot 1{,}05} = 384{,}237 \text{ МПа};$$

$$\tilde{R}_2 = \frac{699 \cdot 0{,}75}{1{,}45 \cdot 1{,}05} = 344{,}335 \text{ МПа};$$

$$\tilde{R}_3 = \frac{891 \cdot 0{,}75}{1{,}45 \cdot 1{,}05} = 438{,}916 \text{ МПа};$$

$$\tilde{R}_4 = \frac{789 \cdot 0{,}75}{1{,}45 \cdot 1{,}05} = 388{,}67 \text{ МПа};$$

$$\tilde{R}_5 = \frac{764 \cdot 0{,}75}{1{,}45 \cdot 1{,}05} = 376{,}354 \text{ МПа}.$$

2. $\bar{R}_1 = \dfrac{\sum_1^k \tilde{R}_1}{k}$; $\Delta\bar{t} = \dfrac{\sum_1^k \Delta\tilde{t}}{k}$; $\bar{p} = \dfrac{\sum_1^k \tilde{p}}{k}$;

$$\bar{R}_1 = 386{,}503 \text{ } МПа;$$

$$\Delta\bar{t} = \frac{-20 + 22 + 21 + 23 + 19}{5} = 13°C;$$

$$\bar{p} = \frac{3{,}4 + 2{,}9 + 3{,}2 + 4 + 3{,}0}{5} = 3{,}3 \text{ } МПа.$$

3. $\delta_1 = \dfrac{n\bar{p}D_н}{2(\bar{R}_1 + n\bar{p})}$, n=1,10;

$$\delta_1 = \frac{1{,}1 \cdot 3{,}3 \cdot 10^6 \cdot 1{,}22}{2(386{,}503 + 1{,}1 \cdot 3{,}3) \cdot 10^6} = \frac{4{,}429}{580{,}462} = 0{,}0016 \text{ } м.$$

$\delta_н$=10 мм;

4. $\bar{\sigma}_{прN} = \mu \dfrac{n\bar{p}D_{вн}}{2 \cdot \delta_н} - \alpha E \Delta\bar{t}$;

$$\bar{\sigma}_{прN} = 0{,}3 \frac{1{,}1 \cdot 3{,}3 \cdot 10^6 \cdot 1{,}22}{2 \cdot 0{,}01} - 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 13 = 40{,}429 \text{ } МПа.$$

Так как $\overline{\sigma}_{npN} > 0$, то напряжения будут растягивающими, и предварительно определенное номинальное значение $\delta_н$ для дальнейших расчетов принимается без изменений.

5. $\tilde{\sigma}_{кц} = \dfrac{n\tilde{p}D_{вн}}{2\delta}$;

$$\tilde{\sigma}_{кц1} = \frac{1{,}1\cdot 3{,}4\cdot 1{,}22}{2\cdot 0{,}01} = 228{,}14\ МПа;$$

$$\tilde{\sigma}_{кц2} = \frac{1{,}1\cdot 2{,}9\cdot 1{,}22}{2\cdot 0{,}01} = 194{,}59\ МПа;$$

$$\tilde{\sigma}_{кц3} = \frac{1{,}1\cdot 3{,}2\cdot 1{,}22}{2\cdot 0{,}01} = 214{,}72\ МПа;$$

$$\tilde{\sigma}_{кц4} = \frac{1{,}1\cdot 4\cdot 1{,}22}{2\cdot 0{,}01} = 268{,}4МПа;$$

$$\tilde{\sigma}_{кц5} = \frac{1{,}1\cdot 3\cdot 1{,}22}{2\cdot 0{,}01} = 201{,}3\ МПа;$$

$$\overline{\sigma}_{кц} = \frac{\sum_{1}^{k}\tilde{\sigma}_{кц}}{k};$$

$$\overline{\sigma}_{кц} = \frac{325{,}435 + 194{,}59 + 335{,}5 + 342{,}21 + 201{,}3}{5} = 221{,}431\ МПа.$$

6. $\tilde{\sigma}_{npN} = \mu\dfrac{n\tilde{p}D_{вн}}{2\delta} - \alpha E\Delta\tilde{t}$;

$$\tilde{\sigma}_{npN1} = 0{,}3\frac{1{,}1\cdot 3{,}4\cdot 10^{6}\cdot 1{,}22}{2\cdot 0{,}01} - 10^{-5}\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot(-20) = 108{,}442\ МПа;$$

$$\tilde{\sigma}_{npN2} = 0{,}3\frac{1{,}1\cdot 2{,}9\cdot 10^{6}\cdot 1{,}22}{2\cdot 0{,}01} - 10^{-5}\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 22 = 14{,}377\ МПа;$$

$$\tilde{\sigma}_{npN3} = 0{,}3\frac{1{,}1\cdot 3{,}2\cdot 10^{6}\cdot 1{,}22}{2\cdot 0{,}01} - 10^{-5}\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 21 = 22{,}416\ МПа;$$

$$\tilde{\sigma}_{npN4} = 0{,}3\frac{1{,}1\cdot 4\cdot 10^{6}\cdot 1{,}22}{2\cdot 0{,}01} - 10^{-5}\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 23 = 34{,}522\ МПа;$$

$$\tilde{\sigma}_{npN5} = 0{,}3\frac{1{,}1\cdot 3\cdot 10^{6}\cdot 1{,}22}{2\cdot 0{,}01} - 10^{-5}\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 19 = 22{,}39\ МПа;$$

$$\overline{\sigma}_{np.N} = \frac{\sum_{1}^{k}\tilde{\sigma}_{np.N}}{k};$$

$$\overline{\sigma}_{np.N} = \frac{137{,}63 + 14{,}377 + 58{,}65 + 56{,}663 + 22{,}39}{5} = 40{,}429\ МПа.$$

7. $\tilde{\sigma}_{i} = \sqrt{\tilde{\sigma}_{кц}^{\ 2} - \tilde{\sigma}_{кц}\cdot\tilde{\sigma}_{np.N} + \tilde{\sigma}_{np.N}^{\ 2}}$;

$\tilde{\sigma}_{1} = 197{,}655\ МПа$;

$\tilde{\sigma}_{2} = 187{,}814МПа$;

$\tilde{\sigma}_{3} = 204{,}436МПа$;

$\tilde{\sigma}_{4} = 252{,}913\ МПа$;

$\tilde{\sigma}_{5} = 191{,}091\ МПа$;

$\overline{\sigma}_{i} = \sqrt{\overline{\sigma}_{кц}^{\ 2} - \overline{\sigma}_{кц}\cdot\overline{\sigma}_{np.N} + \overline{\sigma}_{np.N}^{\ 2}}$;

$\overline{\sigma}_{i} = 204{,}239\ МПа$.

8. $\overline{Q} = \overline{\sigma}_{кц} = 221{,}431МПа$;

$\tilde{Q}_1 = \tilde{\sigma}_{кц1} = 228{,}14\ МПа,\ \tilde{Q}_2 = \tilde{\sigma}_{кц2} = 194{,}59\ МПа;$

$\tilde{Q}_3 = \tilde{\sigma}_{кц3} = 214{,}72\ МПа,\ \tilde{Q}_4 = \tilde{\sigma}_{кц4} = 268{,}4\ МПа;$

$\tilde{Q}_5 = \tilde{\sigma}_{кц5} = 201{,}3\ МПа.$

9. $\tilde{R} = \tilde{\psi}_1 \cdot \tilde{R}_1;$

$$\tilde{\psi}_1 = \sqrt{1 - 0{,}75\left(\frac{\tilde{\sigma}_{кц}}{\tilde{R}_1}\right)^2} - 0{,}5\frac{\tilde{\sigma}_{кц}}{\tilde{R}_1};$$

$\tilde{R}_1 = 0{,}561 \cdot 384{,}237 = 215{,}478\ МПа,\ \tilde{R}_2 = 0{,}589 \cdot 344{,}335 = 202{,}984\ МПа;$

$\tilde{R}_3 = 0{,}661 \cdot 438{,}916 = 290{,}219\ МПа,\ \tilde{R}_4 = 0{,}456 \cdot 388{,}67 = 177{,}305\ МПа;$

$\tilde{R}_5 = 0{,}619 \cdot 376{,}355 = 232{,}894\ МПа.$

Определение вероятности отказа

1. $\overline{Q} = \dfrac{\sum_1^k \tilde{Q}}{k};\ \overline{R} = \dfrac{\sum_1^k \tilde{R}}{k};\ \overline{S} = \overline{R} - \overline{Q}.$

$\overline{Q} = 221{,}431\ МПа;\ \overline{R} = 225{,}6\ МПа;\ \overline{S} = 2{,}345\ МПа.$

2. $$\breve{Q} = \frac{\sum_1^k (\tilde{Q} + \overline{Q})^2}{k};$$

$$\breve{R} = \frac{\sum_1^k (\tilde{R} + \overline{R})^2}{k}.$$

3. $\breve{Q} = 196809\ МПа^2;$

$\breve{R} = 201734{,}5\ МПа^2.$

4. $\hat{S} = \sqrt{\breve{S}} = \sqrt{\breve{R} + \breve{Q}} = 631{,}303\ МПа^2.$

5. $\gamma = \dfrac{\overline{S}}{\hat{S}} = \dfrac{2{,}345}{631{,}303} = 0{,}0037;$

$\Phi(\gamma) = 0{,}00148.$

6. $P = \dfrac{1}{2} - \Phi(\gamma) = 0{,}4985.$

7., $P \geq P_{доп}$,следовательно, необходимо найти решение для снижения вероятности отказа.

3Расчёт остаточного ресурса нефтепроводов по характеристикам трещиностойкости стали

3.1Теоретические сведения

Расчёт остаточного ресурса выполняется по характеристикам трещиностойкости, определенным в соответствии с ГОСТ и методикой, и включает в себя:

1. Определение допускаемой глубины трещиноподобных дефектов по максимальным усреднённым рабочим давлениям за принятый к исследованию год эксплуатации.
2. Определение критической глубины трещины при средних рабочих давлениях.
3. Определение остаточного ресурса по трещиностойкости.
4. Определение предельного разрешенного давления при глубине трещинодобных дефектов не более допускаемой глубины.

Исходными данными служат:

1) результаты испытаний на трещиностойкости при циклическом растяжении образцов стаи трубы по ГОСТ 25.506-85

2) результаты механических испытаний на разрыв образцов стали трубы по ГОСТ 1497-84

3) результаты анализы режима работы трубопровода, материалов коррозионных изысканий и обследований.

Исходные данные для расчёта выбираются из таблиц3.1,3.2 и 3.3 по номеру варианта.

Таблица 3.1 - Исходные данные к расчётам остаточного ресурса

Номер образца	½-1 ½-2 ½-3	2/2-1 2/2-2 2/2-3	3/2-1 3/2-2 3/2-3	4/2-1 4/2-2 4/2-3	5/2-1 5/2-2 5/2-3	6/2-1 6/2-2 6/2-3	7/2-1 7/2-2 7/2-3
Временное сопротивление растяжениюσ$_{вр}$, МПа	594	597	598	539	576	532	581
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	390	408	391	376	395	370	352
Относительное сужение после разрыва $\psi_к$, %	47,2	60,3	54,3	48,5	44,9	69,9	64,3
Максимальное рабочее давление $P_{раб}$, МПа	3,15	3,15	3,15	3,63	2,37	2,89	3,95
Среднее рабочее давление $P_{ср}$, МПа	2,99	2,99	2,99	3,33	1,89	2,60	3,32
Толщина стенки трубы, мм	12,5	12,5	12,5	9,0	9,0	8,0	8,0
Наружный диаметр трубы, мм	1020	1020	1020	820	820	529	529
Число циклов перепада давления за год N	295	295	295	289	178	136	579

Таблица 3.1 - Коэффициенты равномерного сужения сечения образцовпри испытаниях на растяжение по ГОСТ 1497-84

Номер образца	Усреднённые рабочие характеристики рабочего сечения			c
	Начальный диаметр, мм	Диаметр шейки, мм	Диаметр сечения равномерного сужения, мм	
1/2	5,1	2,98	4,60	18,65
2/2	5	2,77	4,65	13,51
3/2	5	2,89	4,63	14,26
4/2	5	3,03	4,65	13,51
5/2	5	2,95	4,40	22,56
6/2	5	2,50	4,62	14,62
7/2	5	2,60	4,60	15,36

Исходными данными для решения служат:

1) Результаты испытаний на трещиностойкость при статическом циклическом растяжении образцов стали труб по ГОСТ 25.506-85
2) Результаты механических испытаний при однократном растяжении статической нагрузкой образцов стали трубы по ГОСТ 1497-84
3) Результаты анализа режима работы трубопровода, материалов коррозионных изысканий и обследований.

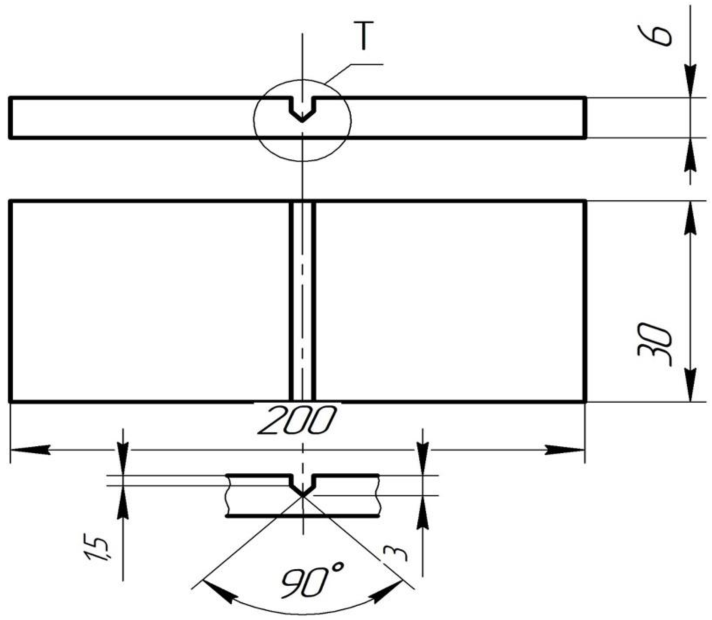

Рис.3.1 -Образец для испытаний на трещиностойкость

Выпишем формулы, по которым определяются количественные характеристики надёжности изделия.

1) Вероятность безотказной работы от 0 до *t*:

$$p(t) = \exp(-\int_0^t \lambda(t)dt) = 1 - \int_0^t f(t)dt\,. \qquad (3.1)$$

2) Вероятность отказа изделия на интервале времени от 0 до t:

$$q(t) = 1 - p(t)\,. \qquad (3.2)$$

3) Частота отказа изделия:

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}\,. \qquad (3.3)$$

4) Интенсивность отказа изделия:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}\,. \qquad (3.4)$$

5) Среднее время безотказной работы изделия:

$$m_t = \int_0^\infty p(t)dt\,. \qquad (3.5)$$

Формулы (3.1)-(3.5) для экспоненциального закона распределения примут вид:

$$p(t) = e^{-\lambda t};\ q(t) = 1 - e^{-\lambda t};\ f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \qquad (3.6)\text{-}(3.8)$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda\,; \qquad (3.9)$$

$$m_t = \frac{1}{\lambda}\,. \qquad (3.10)$$

Формулы (3.1)-(3.5) для нормального закона распределения примут вид:

$$p(t) = 0{,}5 - \Phi(U)\,; \qquad (3.11)$$

$$q(t) = 0{,}5 + \Phi(U)\,, \qquad (3.12)$$

где $U = \frac{t - m_t}{\sigma_t}$; $\Phi(U) = \frac{1}{2\pi}\int_0^U e^{-\frac{U^2}{2}}dU$ - функция Лапласа;

$$f(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma_t}\,; \qquad (3.13)$$

$$\lambda(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma(t)} \cdot \frac{1}{0{,}5 - \Phi(U)}\,, \qquad (3.14)$$

где $\varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{U^2}{2}}$.

$\Phi(U)$ -функция Лапласа, обладающая свойствами:

$$\Phi(0) = 0\,; \qquad (3.15)$$

$$\Phi(-U) = -\Phi(U)\,. \qquad (3.16)$$

Значения интегральной функции Лапласа приведены в приложении 2

Здесь m_t - среднее значение случайной величины *t*, σ_t - среднеквадратичное отклонение случайной величины *t*, *t* - время безотказной работы изделия

Формулы (3.1)-(3.5) для закона распределения Вейсбулла имеют вид:

$$p(t) = e^{-at^k}\,; \qquad (3.17)$$

$$f(t) = akt^{k-1} \cdot p(t)\,; \qquad (3.18)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}; \qquad (3.19)$$

$$m(t)=\frac{\frac{1}{k}\Gamma\left(\frac{1}{k}\right)}{a^{\frac{1}{k}}},\qquad(3.20)$$

где *a,k* - параметры закона распределения Вейсбулла. *Г(x)* - гамма-функция, значения которой приведены в приложении 3.

3.2 Решение типовых задач

Задача 1. Время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 2{,}5\cdot 10^{-5}$ 1/час.

Требуется вычислить количественные характеристики надежности элемента $p(t), q(t), f(t), m_t$ для *t*=1000 час.

Решение. Используем формулы (3.6), (3.7), (3.8), (3.10) для $p(t), q(t), f(t), m_t$.

1. Вычислим вероятность безотказной работы:

$$p(1000)=e^{2{,}5\cdot 10^{-5}\cdot 1000}=e^{-0{,}025}=0{,}9753\,.$$

2. Вычислим вероятность отказа $q(1000)$. Имеем:

$$q(1000)=1-p(1000)=0{,}0247\,.$$

3. Вычислим частоту отказов:

$$f(t)=\lambda(1000)\cdot p(1000)=2{,}5\cdot 10^{-5}\cdot 0{,}9753=2{,}439\cdot 10^{-5}\ \text{1/час.}$$

4. Вычислим среднее время безотказной работы:

$$m_t=\frac{1}{\lambda(1000)}=\frac{1}{2{,}5\cdot 10^{-5}}=40000\ \text{час.}$$

Задача 2. Время работы элемента до отказа подчинено нормальному закону с параметрами $m_t = 8000$ час, $\sigma_t = 2000$ час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $p(t), f(t), \lambda(t), m_t$ для *t*=10000 час.

Решение. Воспользуемся формулами (3.11), (3.12), (3.13), (3.14) для определения $p(t), f(t), \lambda(t), m_t$.

1. Вычислим вероятность безотказной работы:

$$p(t)=0{,}5-\Phi(U);\ U=(t-m_t)/\sigma_t;$$

$$U=(10000-8000)/2000=1;\ \Phi(1)=0{,}3413;$$

$$p(10000)=0{,}5-0{,}3413=0{,}1587.$$

2. Определим частоту отказа $f(t)$:

$$f(t)=\frac{\varphi(U)}{\sigma_t};$$

$$f(10000)=\frac{\varphi(1)}{\sigma_{10000}}=\frac{0.242}{2000}=12{,}1\cdot 10^{-5}\ 1/\mathit{час}.$$

3. Рассчитаем интенсивность отказов $\lambda(t)$:

$$\lambda(t)=f(t)/p(t);$$

$$\lambda(10000)=f(10000)/p(10000)=12{,}1\cdot 10^{-5}/0{,}1587=76{,}4\cdot 10^{-5}\ 1/\mathit{час}.$$

4. Среднее время безотказной работы элемента:

$$m_t=8000\ \mathit{час}.$$

Задача 3. Время безотказной работы изделия подчиняется закону Вейсбулла с параметрами $k=1{,}5;\ a=10^{-4}\ 1/\mathit{час}$, а время работы изделия $t=100\ \mathit{час}$. Требуется вычислить количественные характеристики надежности изделия $p(t), f(t), \lambda(t), m_t$.

Решение.

1. Определим вероятность безотказной работы $p(t)$ по формуле (2.18). Имеем:

$$p(t)=e^{-at^k};\ p(100)=e^{-10^{-4}\cdot 100^{1{,}5}};$$

$$p(t)=0{,}9048.$$

2. Определим частоту отказов $f(t)$:

$$f(t) = akt^{k-1} \cdot p(t);$$

$$f(t) = 13{,}572 \cdot 10^{-4}\ 1/\textit{час}.$$

3. Определим интенсивность отказов $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = f(t)/p(t);$$

$$\lambda(t) = 15 \cdot 10^{-4}\ 1/\textit{час}.$$

4. Определим среднее время безотказной работы изделия m_t:

$$m_t = \frac{\frac{1}{k} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{k}\right)}{a^{1/k}} = \frac{\frac{1}{1{,}5} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{1{,}5}\right)}{\left(10^{-4}\right)^{1/1{,}5}} = \frac{0{,}666 \cdot \Gamma(0{,}666)}{10^{-2{,}666}}.$$

Так как $z\Gamma(z) = \Gamma(z+1)$, то

$$m_t = \frac{\Gamma(1{,}666)}{10^{-2{,}666}};$$

$$x = 10^{-2{,}666};\ \lg x = -2{,}666 \lg 10;\ x = 0{,}00215.$$

Используя приложение 2, получим:

$$m_t = \frac{0{,}90167}{0{,}00215} = 426\ \textit{час}.$$

3.3Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. Вероятность безотказной работы автоматической линии изготовления цилиндров автомобильного двигателя в течении 120 часов равна 0.9. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется рассчитать интенсивность отказов и частоту отказов линии для момента времени t=120 час., а также среднее время безотказной работы.

Задача 2. Среднее время безотказной работы автоматической системы управления равно 640 час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение 120 час., частоту отказов для момента времени t=120 час и интенсивность отказов.

Задача 3. Время работы изделия подчинено нормальному закону с параметрами: $m_t = 8000\ \textit{час}, \sigma_t = 10000\ \textit{час}$. Требуется вычислить количественные характеристики надежности: $p(t), f(t), \lambda(t), m_t\ \textit{для}\ t = 10000\ \textit{час}$.

Задача 4. Время исправной работы скоростных шарикоподшипников подчинено закону Вейбулла с параметрами: $k = 2{,}6;\ a = 1{,}65 \cdot 10^{-7}\ 1/\textit{час}$.

Требуется вычислить количественные характеристики надежности: $p(t), f(t), \lambda(t)\ \textit{для}\ t = 150\ \textit{час}$ и среднее время безотказной работы шарикоподшипников.

Задача 5. Определить вероятность безотказной работы и интенсивность отказов прибора при t=1300 часов работы, если при испытаниях получено значение среднего времени безотказной работы $m_t = 1500\ \textit{час}$ и среднее квадратичное отклонение $\sigma_t = 1000\ \textit{час}$.

4 Прогнозирование остаточного ресурса по изменению толщины стенки и по отказам элементов трубопровода

4.1Теоретические сведения

Цель работы: ознакомиться с методикой вероятностной оценки остаточного ресурса технологических стальных трубопроводов и научиться прогнозировать остаточный ресурс технологического трубопровода по изменению толщины стенки и по отказам его элементов.

Относительный износ стенки определяется по формуле (4.1):

$$\delta_k = 1 - \frac{t_k}{t_{nk}} \qquad (4.1)$$

где t_k - измеренная толщина стенки в месте k-того элемента, мм; t_{nk} - номинальная толщина стенки диагностируемого элемента, мм.

Значение среднего относительного износа трубопроводаопределяется по формуле (4.2):

$$\delta_{cp} = \sum_{k=1}^{N} \delta_k / N \qquad (4.2)$$

где δ_k - относительный износ стенки k-того элемента, N – количество замеренных точек.

Среднее квадратическое отклонение утонения стенки трубопровода определяется по формуле (4.3):

$$S_\delta = \sqrt{\sum_{k=1}^{N} \left(\delta_k - \delta_{cp}\right)^2 / N} \qquad (4.3)$$

где δ_k - относительный износ стенки k-того элемента;

δ_{cp} - значение среднего относительного износа трубопровода;

N – количество замеренных точек;

Среднее квадратическое отклонение относительного износа определяется по формуле (4.4):

$$S_d = \sqrt{S_\delta^2 - S_0^2} \qquad (4.4)$$

где S_δ - среднее квадратическое отклонение утонения стенки трубопровода;

S_0 - среднее квадратическое отклонение технологического допуска. В расчетах принимают $S_0 = 0{,}05$;

Верхнее интервальное значение среднего износа определяется по формуле (4.5):

$$\delta_{cp}{}^{*} = \delta_{cp} + U_q \frac{S_d}{\sqrt{N-2}} \qquad (4.5)$$

где δ_{cp} - значение среднего относительного износа трубопровода;

S_d – - среднее квадратическое отклонение относительного износа;

N – количество замеренных точек;

U_q - квантиль, который выбирается по таблице 4.1 Если в расчетах необходимо определить квантиль U_q, то β заменяется на q, а если нужно значение U_γ, то вместо β подставляется $0{,}01\gamma$ и т. д.

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчета остаточного ресурса

β	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,8	0,81	0,82
U_β	0,67	0,71	0,74	0,77	0,81	0,84	0,88	0,92
β	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,9
U_β	0,95	0,99	1,04	1,08	1,13	1,18	1,23	1,28
β	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98
U_β	1,34	1,41	1,48	1,56	1,65	1,75	1,88	2,05
β	0,99	0,993	0,995	0,997	0,998	0,999		
U_β	2,33	2,46	2,58	2,75	2,88	3,09		

Примечание: для промежуточных значений β величина квантиля U_β определяется интерполированием.
Для того, чтобы сделать достаточно определенную оценку остаточного ресурса трубопровода в таблице 2 даны рекомендуемые значения по выбору расчетных вероятностей в зависимости от ответственности трубопровода.

Таблица 4.2 – Категории трубопроводов и их вероятности

Группа и категория трубопровода	Регламентированная вероятность γ, %	Доверительная вероятность q
Аа и сжиженные углеводородные газы (СУГ)	99	0,99
Аб, Ба (кроме СУГ), Бб - I-IIкатегорий, Бв - I-IIкатегорий	95	0,95
Бб - IIIкатегории, Бв - III-IVкатегорий, Вв - II-IIIкатегорий	90	0,9
Вв - IV-V категорий	80	0,8

Среднеквадратическое отклонение верхнего интервального значения среднего износа определяется по формуле (4.6):

$$S_d^{\ *} = S_d + U_q \frac{S_d}{\sqrt{2N-8}} \qquad (4.6)$$

где S_d - среднее квадратическое отклонение относительного износа;

U_q - квантиль, который выбирается по таблице 4.1;

N - количество замеренных точек.

В дальнейших расчетах вместо $\delta_{ср}$ и S_d следует подставлять $\delta_{ср}^{\ *}$ и $S_d^{\ *}$

Среднее значение допустимого относительного износа определяется по формуле (4.7):

$$[\delta\ ]_{ср} = 1 - \frac{t_{отб}}{t_n}, \qquad (4.7)$$

где $t_{отб}$ - отбраковочная толщина стенки, мм;

t_n - номинальная толщина стенки диагностируемого элемента, мм

Квантиль определяется по формуле (4.8):

$$U_\beta = \left([\delta]_{ср} - \delta_{ср}^{\ *}\right) / \sqrt{S_{[\delta]}^2 + S_d^{*2}} \qquad (4.8)$$

где $[\delta]_{ср}$ - среднее значение допустимого относительного износа;

$\delta_{ср}^{\ *}$ - верхнее интервальное значение среднего износа;

S_δ -среднее квадратическое отклонение утонения стенки трубопровода;

$S_{[\delta]}$ -среднее квадратическое отклонение допускаемого износа. В расчетах принимают $S_{[\delta]}$= $S_0 = 0{,}05$;

По таблице 4.1 находим значение β, соответствующее значению U_β

Гарантированная вероятность безотказной работы определяется по формуле (11.9):

$$Г=\gamma\beta. \qquad (4.9)$$

Соответствующий ей квантиль $U_Г$определяется по таблице 1.

Параметр Q определяется по формуле (11.10):

$$Q = \frac{[\delta]_{ср}\,\delta_{ср}^{\ *} - U_Г\sqrt{S_d^{*2}[\delta]_{ср}^{\ 2} + S_{[\delta]}^2\left(\delta_{ср}^{*\ 2} - U_Г^2 S_d^{*2}\right)}}{\delta_{ср}^{*2} - U_Г^2 S_d^{*2}} \qquad (4.10)$$

где $[\delta]_{ср}$ - среднее значение допустимого относительного износа;

$\delta_{ср}^{\ *}$ - верхнее интервальное значение среднего износа;

$S_{[\delta]}$ - среднее квадратическое отклонение допускаемого износа. В расчетах принимают $S_{[\delta]} = S_0 = 0{,}05$;

$U_Г$ - квантиль, который выбирается по таблице 4.1;

S_d^* - среднеквадратическое отклонение верхнего интервального значения среднего износа;

Нижняя интервальная оценка остаточного ресурса определяется по формуле (4.11):

$$\tau_{ост} = \tau_d (Q-1), \qquad (4.11)$$

где τ_d - наработка с момента начала эксплуатации до момента последнего диагностирования, лет.

Доля отказавших элементов определяется по формуле (4.12):

$$\alpha = \frac{(\gamma+1)}{z}, \qquad (4.12)$$

где z – полное число элементов;γ - число отказавших элементов.

Величина γ-процентного остаточного ресурса подсчитывается по формуле:

$$\tau_{ост} = \tau_d \frac{\left([\delta]_{ср} - \delta_{ср}^*\right)}{\left(\dfrac{\dfrac{[\delta]_{ср}}{U_{1-\alpha}}}{\dfrac{U_{1-\alpha}}{U_{\gamma(1-\alpha)}} - 1} + \delta_{ср}^*\right)}, \qquad (4.13)$$

где τ_d - наработка с момента начала эксплуатации до момента последнего диагностирования, лет.

$[\delta]_{ср}$ - среднее значение допустимого относительного износа;

$\delta_{ср}^*$ - верхнее интервальное значение среднего износа;

$U_{1-\alpha}$ - квантиль нормального распределения, определяется по таблице 11.1;

$U_{\gamma(1-\alpha)}$- квантиль нормального распределения, определяется по таблице 10.1.

Если расчетный ресурс получается равным более 10 лет, то назначенный остаточный ресурс будет равен 10 годам. Если расчетный ресурс получается равным менее 10 лет (например, 5,2 года), то остаточный ресурс принимаем равным этому значению, округляя в меньшую сторону до целого числа (5 лет).

4.3 Пример решения типовых задач

Проведено диагностирование технологического трубопровода категории III группы Б(б) для транспортировки легковоспламеняющихся жидкостей. Материал труб и фасонных элементов сталь 20. Протяженность магистрали из труб 89х4 мм – 18500 мм. Протяженность магистрали из труб 114х4,5 мм – 19000 мм. Трубопровод находится в эксплуатации с 1970 года. Трубопровод состоит из 13 элементов (участки прямых труб, отводы, переходы). За время эксплуатации не зарегистрировано ни одного отказа его элементов.

Исходные данные:

Таблица 4.3 - Исходные данные примера

№ точки	Наименование элемента (первоначальный диаметр и толщина по паспорту, мм)	Отбраковочнаятолщинаэлемента, мм	Минимальная измеренная толщина в сечениях, мм
1	Труба 89х4	2,0	
2	Труба 89х4	2,0	
3	Отвод 89х5	2,0	
4	Труба 89х4	2,0	
5	Отвод 89х5	2,0	
6	Труба 114х4,5	2,0	
7	Труба 114х4,5	2,0	
8	Отвод 114х6	2,0	
9	Труба 114х4,5	2,0	
10	Переход114х4,5-89х4	2,0	
11	Переход114х4,5-89х4	2,0	

Согласно рекомендациям, содержащимся в таблице 10.2, принимаем значения регламентированной надежности $\gamma = 90\%$ и односторонней доверительной вероятности $q = 0{,}90$.

Прогнозирование остаточного ресурса по изменению толщины стенки

Относительный износ стенки определяем по формуле (4.1):

$$\delta_1 = 1 - \frac{3{,}3}{4{,}0} = 0{,}175,\ \delta_2 = 1 - \frac{3{,}7}{4{,}0} = 0{,}075,$$

$$\delta_3 = 1 - \frac{4{,}0}{5{,}0} = 0{,}2,\ \delta_4 = 1 - \frac{3{,}6}{4{,}0} = 0{,}1,$$

$$\delta_5 = 1 - \frac{3{,}8}{5{,}0} = 0{,}24,\ \delta_6 = 1 - \frac{3{,}5}{4{,}5} = 0{,}222,$$

$$\delta_7 = 1 - \frac{3{,}9}{4{,}5} = 0{,}133,\ \delta_8 = 1 - \frac{4{,}8}{6{,}0} = 0{,}2,$$

$$\delta_9 = 1 - \frac{4{,}2}{4{,}5} = 0{,}067,\ \delta_{10} = 1 - \frac{4{,}2}{4{,}5} = 0{,}067,$$

$$\delta_{11} = 1 - \frac{3{,}7}{4{,}0} = 0{,}075.$$

По формуле (4.2) определяем среднее значение среднего относительного износа трубопровода:

$$\delta_{cp} = \frac{\begin{matrix} 0{,}175 + 0{,}075 + 0{,}2 + 0{,}1 + 0{,}24 + \\ + 0{,}222 + 0{,}133 + 0{,}2 + \\ + 0{,}067 + 0{,}067 + 0{,}075 \end{matrix}}{11} = 0{,}14.$$

По формуле (10.3) определяем среднее квадратическое отклонение утонения стенки трубопровода:

$$S_\delta = \sqrt{\frac{\begin{matrix} (0{,}175 - 0{,}14)^2 + (0{,}075 - 0{,}14)^2 + (0{,}2 - 0{,}14)^2 + \\ + (0{,}1 - 0{,}14)^2 + (0{,}24 - 0{,}14)^2 + (0{,}222 - 0{,}14)^2 + \\ + (0{,}133 - 0{,}14)^2 + (0{,}2 - 0{,}14)^2 + (0{,}067 - 0{,}14)^2 + \\ + (0{,}067 - 0{,}14)^2 + (0{,}075 - 0{,}14)^2 \end{matrix}}{11}} = 0{,}065.$$

По формуле (4.4) определим среднее квадратическое отклонение относительного износа:

$$S_d = \sqrt{0{,}065^2 - 0{,}05^2} = 0{,}042.$$

По формуле (4.5) определим верхнее интервальное значение среднего износа:

$$\delta_{cp}{}^* = 0{,}14 + 1{,}28\frac{0{,}042}{\sqrt{11 - 2}} = 0{,}158,$$

где U_q - квантиль, который выбирается по таблице 4.1 в зависимости от q. q в свою очередь выбирается по таблице 4.2 в зависимости от категории и группы трубопровода. В нашем случае категории III группы Б(б). Ему соответствует доверительная вероятность q равная 0,90. По таблице 10.1 находим значение U_q соответствующее значению $q = 0{,}90$. $U_q = 1{,}28$;

По формуле (4.6) определим среднеквадратическое отклонение верхнего интервальное значение среднего износа:

$$S_d{}^* = 0{,}042 + 1{,}28 \cdot \frac{0{,}042}{\sqrt{2 \cdot 11 - 8}} = 0{,}056.$$

По формуле (4.7) определяем среднее значение допустимого относительного износа для каждого типа размера труб:

Для трубы размером 89х4

$$[\delta]_{cp} = 1 - \frac{2{,}0}{4{,}0} = 0{,}5.$$

Для трубы размером 114х4,5

$$[\delta]_{cp} = 1 - \frac{2{,}0}{4{,}5} = 0{,}56.$$

Находим среднее значение допустимого относительного износа с учетом типоразмеров труб и их протяженности.

$$[\delta]_{ср} = \frac{0{,}5 \cdot 18{,}5 + 0{,}56 \cdot 19}{18{,}5 + 19} = 0{,}53.$$

По формуле (4.8) определим квантиль:

$$U_\beta = (0{,}53 - 0{,}158)/\sqrt{0{,}05^2 + 0{,}056^2} = 4{,}96.$$

Так как U_β получилась больше значений, приведенных в таблице 10.1 то $\beta = 1{,}0$

По формуле (4.9) определим гарантированную вероятность безотказной работы:

$$\Gamma = 0{,}90 \cdot 1{,}0 = 0{,}9.$$

Значение U_Γ, соответствующее $\Gamma = 0{,}9$ находим по таблице 4.1:

$$U_\Gamma = 1{,}28.$$

По формуле (4.10) определим параметр Q

$$Q = \frac{0{,}53 \cdot 0{,}158 - 1{,}28\sqrt{0{,}056^2 \cdot 0{,}53^2 + 0{,}05^2\left(0{,}158^2 - 1{,}28^2 \cdot 0{,}056^2\right)}}{0{,}158^2 - 1{,}28^2 \cdot 0{,}056^2} = 2{,}26.$$

По формуле (4.11) определяем нижнюю интервальную оценку остаточного ресурса:

$$\tau_{ост1} = 41 \cdot (2{,}26 - 1) = 57{,}1 \text{ лет.}$$

Прогнозирование остаточного ресурса по отказам элементов трубопровода

По формуле (4.12) определяем долю отказавших элементов**:**

$$\alpha = \frac{(0+1)}{13} = 0{,}077.$$

Значение $1-\alpha$ =1-0,077=0,923.

Величина $0{,}01\gamma$ =0,90 и $0{,}01\gamma \cdot (1-\alpha)$ = 0,90·0,923=0,831.

Применяя метод интерполирования находим квантили нормального распределения:

$$U_{1-\alpha} = 1{,}431 \text{ и } U_{\gamma(1-\alpha)} = 0{,}954.$$

Величина относительного допускаемого износа $[\delta]_{ср}$=0,53 из расчета остаточного ресурса по изменению толщины стенки.

По формуле (4.13) определяем величину γ-процентного остаточного ресурса:

$$\tau_{ост} = 41 \cdot \frac{0{,}53 - 0{,}158}{\left(\dfrac{0{,}53}{\dfrac{1{,}431}{0{,}954} - 1} + 0{,}158\right)} = 12{,}3 \text{ лет.}$$

Для назначения остаточного ресурса выбираем минимальное значение из двух полученных $\tau_{ост}$ =57,1 лет и $\tau_{ост}$ =12,3 лет.

Так как расчетный минимальный остаточный ресурс получился равным 12,3 годам, что больше 10 лет, то назначенный остаточный ресурс трубопровода составляет $\tau_{ост}$ =10 лет.

4.3Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1.Проведено диагностирование технологического трубопровода категории I группы А(а) для транспортировки высокоопасного вещества. Материал труб и фасонных элементов сталь 20. Протяженность магистрали из труб 219х8 мм – 1300 мм. Протяженность магистрали из труб 219х10 мм – 13400 мм. Протяженность магистрали из труб 219х9 мм – 13400 мм. Трубопровод состоит из 32 элементов (участки прямых труб, отводы, переходы). За время эксплуатации не зарегистрировано ни одного отказа его элементов.

Трубопровод находится в эксплуатации с 1975 года. Проведенные при диагностировании замеры толщин показаны в следующей таблице:

Таблица 4.4- Исходные данные для задачи 1

№ точки	Наименование элемента (первоначальный диаметр и толщина попаспорту, мм)	Отбраковочнаятолщинаэлемента, мм	Минимальнаяизмереннаятолщинавсечениях, мм
1	Труба 219x8	2,5	7,5
2	Труба 219x8	2,5	7,2
3	Отвод 219x8	2,5	6,5
4	Труба 219x8	2,5	7,0
5	Труба 219x8	2,5	7,1
6	Отвод 219x9	2,5	8,2
7	Труба 219x10	2,5	9,2
8	Труба 219x10	2,5	8,2
9	Труба 219x10	2,5	8,7
10	Труба 219x10	2,5	9,3
11	Труба 219x10	2,5	9,4
12	Труба 219x10	2,5	9,5
13	Отвод 219x9	2,5	8,5
14	Труба 219x9	2,5	7,8
15	Отвод 219x9	2,5	7,6
16	Труба 219x9	2,5	7,5
17	Отвод 219x9	2,5	7,2
18	Труба 219x9	2,5	7,0
19	Переход 219x10/219x8	2,5	8,9
20	Переход 219x10/219x8	2,5	7,3
21	Отвод 219x9	2,5	8,0
22	Труба 219x9	2,5	8,5
23	Труба 219x9	2,5	8,4
24	Отвод 219x9	2,5	8,6
25	Труба 219x9	2,5	8,6
26	Труба 219x9	2,5	8,3
27	Труба 219x9	2,5	8,2
28	Труба 219x9	2,5	8,4
29	Отвод 219x9	2,5	8,0
30	Труба 219x9	2,5	8,2
31	Труба 219x9	2,5	8,3
32	Труба 219x9	2,5	8,6
33	Отвод 219x9	2,5	8,7
34	Труба 219x9	2,5	8,6
35	Труба 219x9	2,5	8,8
36	Отвод 219x9	2,5	8,2
37	Труба 219x9	2,5	8,3
38	Труба 219x9	2,5	8,4
39	Отвод 219x9	2,5	8,2
40	Труба 219x9	2,5	8,1
41	Труба 219x9	2,5	7,9
42	Труба 219x9	2,5	8,4
43	Отвод 219x9	2,5	8,7
44	Труба 219x9	2,5	8,5
45	Труба 219x9	2,5	8,3
46	Труба 219x9	2,5	8,1
47	Труба 219x9	2,5	8,6
48	Труба 219x9	2,5	8,0
49	Труба 219x9	2,5	8,1
50	Труба 219x9	2,5	8,2
51	Отвод 219x9	2,5	6,7
52	Труба 219x9	2,5	8,2
53	Труба 219x9	2,5	8,0
54	Труба 219x9	2,5	8,1
55	Отвод 219x9	2,5	6,4
56	Труба 219x9	2,5	8,0
57	Труба 219x9	2,5	8,1
58	Труба 219x9	2,5	8,3
59	Труба 219x9	2,5	8,3
60	Труба 219x9	2,5	8,2

Задача 2.Проведено диагностирование технологического трубопровода категории II группы А(б) для транспортировки умеренно опасного вещества. Материал труб и фасонных элементов сталь 20. Протяженность магистрали из труб 108х5 мм – 22900 мм. Протяженность магистрали из труб 89х4 мм – 68600 мм. Протяженность магистрали из труб 57х5 мм – 151400 мм. Трубопровод состоит из 68 элементов (участки прямых труб, отводы, переходы). За время эксплуатации не зарегистрировано ни одного отказа его элементов.

Трубопровод находится в эксплуатации с 1977 года. Проведенные при диагностировании замеры толщин показаны в следующей таблице:

Таблица 4.5 - Исходные данные для задачи 2

№ точки	Наименование элемента(первоначальный диаметри толщина попаспорту, мм)	Отбраковочнаятолщинаэлемента, мм	Минимальнаяизмереннаятолщинав сечениях, мм
1	Труба 57х5	1.5	2,9
2	Отвод 57х5	1.5	2,7
3	Труба 57х5	1.5	3,4
4	Отвод 57х5	1.5	3,2
5	Труба 57х5	1.5	3,1
6	Отвод 57х5	1.5	3,0
7	Труба 57х5	1.5	3,0
8	Труба 57х5	1.5	2,9
9	Отвод 57х5	1.5	2,8
10	Труба 57х5	1.5	3,2
11	Труба 57х5	1.5	3,3
12	Труба 57х5	1.5	3,4
13	Труба 57х5	1.5	3,4
14	Труба 57х5	1.5	3,3
15	Труба 57х5	1.5	3,5
16	Труба 57х5	1.5	3,4
17	Труба 57х5	1.5	3,5
18	Труба 57х5	1.5	3,5
19	Отвод 57х5	1.5	2,5
20	Труба 57х5	1.5	3,2
21	Труба 57х5	1.5	3,3
22	Труба 57х5	1.5	3,1
23	Труба 57х5	1.5	3,4
24	Труба 57х5	1.5	3,2
25	Труба 57х5	1.5	3,5
26	Труба 57х5	1.5	3,4
27	Труба 57х5	1.5	3,4
28	Переход 89х4-57х5	2,0	3,8
29	Переход 89х4-57х5	2,0	4,6
30	Отвод 89х4	2.0	3,5
31	Труба 89х4	2.0	3,2
32	Труба 89х4	2.0	3,4
33	Труба 89х4	2.0	3,4
34	Труба 89х4	2.0	3,6
35	Труба 89х4	2.0	3,4
36	Труба 89х4	2.0	3,5
37	Труба 89х4	2.0	3,6
38	Труба 89х4	2.0	3,7
39	Отвод 57х5	1.5	3,5
40	Труба 89х4	2.0	3,6
41	Отвод 89х4	2.0	3,4
42	Труба 89х4	2.0	3,4
43	Отвод 89х4	2.0	3,6
44	Труба 89х4	2.0	3,5
45	Отвод 89х4	2.0	3,0
46	Труба 89х4	2.0	3,1
47	Труба 89х4	2.0	3,3
48	Труба 108х5	2.0	4,2
49	Труба 108х5	2.0	4,0
50	Труба 108х5	2.0	4,5
51	Отвод 108х5	2.0	4,6

№ точки	Наименование элемента(первоначальный диаметри толщина попаспорту, мм)	Отбраковочнаятолщинаэлемента, мм	Минимальнаяизмереннаятолщинав сечениях, мм
52	Труба 108х5	2.0	4,5
53	Труба 108х5	2.0	4,4
54	Отвод 108х5	2.0	4,4
55	Труба 108х5	2.0	4,4
56	Труба 108х5	2.0	4,3
57	Отвод 108х5	2.0	4,0
58	Труба 108х5	2.0	4,1
59	Труба 108х5	2.0	4,1
60	Труба 108х5	2.0	4,4

Задача 3.Проведено диагностирование технологического трубопровода категории II группы А(б) для транспортировки умеренно опасного вещества. Материал труб и фасонных элементов сталь 20. Протяженность магистрали из труб 108х6 мм – 2000 мм. Протяженность магистрали из труб 89х5 мм – 25300 мм. Протяженность магистрали из труб 57х4,5 мм – 87400 мм. Трубопровод состоит из 115 элементов (участки прямых труб, отводы, переходы). За время эксплуатации не зарегистрировано ни одного отказа его элементов.

Трубопровод находится в эксплуатации с 1955 года. Проведенные при диагностировании замеры толщин показаны в следующей таблице:

Таблица 4.6 - Исходные данные для задачи 3

№ точки	Наименование элемента (первоначальный диаметр и толщина попаспорту, мм)	Отбраковочнаятолщинаэлемента, мм	Минимальная измереннаятолщинавсечениях, мм
1	Труба 89х5	2,0	3.6
2	Труба 89х5	2,0	4.5
3	Труба 89х5	2,0	4.6
4	Труба 108х6	2,0	4.9
5	Отвод 108х7	2,0	5.3
6	Труба 108х6	2,0	5.4
7	Отвод 108х7	2,0	5.3
8	Труба 108х6	2,0	5.5
9	Труба 108х6	2,0	5.4
10	Отвод 108х7	2,0	5.0
11	Труба 108х6	2,0	5.1
12	Труба 108х6	2,0	5.2
13	Переход 159х8-108х6	2,5	7.8
14	Переход 159х8-108х6	2,5	5.5
15	Труба 108х6	2,0	5.6
16	Отвод 108х7	2,0	5.8
17	Труба 108х6	2,0	5.1
18	Труба 108х6	2,0	5.3
19	Отвод 89х6	2,0	5.5
20	Труба 89х5	2,0	4.3
21	Отвод 89х6	2,0	3.7
22	Труба 89х5	2,0	3.4
23	Отвод 89х6	2,0	4.7
24	Труба 89х5	2,0	4.2
25	Отвод 89х6	2,0	3.8
26	Труба 89х5	2,0	5.1
27	Отвод 89х6	2,0	4.4
28	Труба 89х5	2,0	4.5
29	Отвод 57х5	1,5	3.9
30	Труба 57х4,5	1,5	3.4
31	Отвод 57х5	1,5	4.8
32	Труба 57х4,5	1,5	4.0
33	Труба 57х4,5	1,5	4.2

№ точки	Наименование элемента (первоначальный диаметр и толщина попаспорту, мм)	Отбраковочнаятолщинаэлемента, мм	Минимальная измереннаятолщинавсечениях, мм
34	Отвод 57х5	1,5	4.1
35	Труба 57х4,5	1,5	4.1
36	Отвод 57х5	1,5	4.7
37	Труба 57х4,5	1,5	4.2
38	Труба 57х4,5	1,5	4.4
39	Отвод 57х5	1,5	4.7
40	Труба 57х4,5	1,5	3.3
41	Отвод 57х5	1,5	3.8
42	Труба 57х4,5	1,5	3.7
43	Отвод 57х5	1,5	4.9
44	Труба 57х4,5	1,5	4.0
45	Труба 57х4,5	1,5	4.3
46	Труба 57х4,5	1,5	4.3
47	Отвод 57х5	1,5	3.1
48	Труба 57х4,5	1,5	4.1
49	Труба 57х4,5	1,5	4.2
50	Труба 57х4,5	1,5	4.1
51	Отвод 57х5	1,5	3.3
52	Труба 57х4,5	1,5	4.0
53	Труба 57х4,5	1,5	3.9
54	Труба 57х4,5	1,5	3.8
55	Отвод 57х5	1,5	2.9
56	Труба 57х4,5	1,5	3.9
57	Труба 57х4,5	1,5	3.9
58	Труба 57х4,5	1,5	3.8
59	Отвод 57х5	1,5	3.7
60	Труба 57х4,5	1,5	3.7

Задача 4.Проведено диагностирование технологического трубопровода категории IIIгруппы Б(б) для транспортировки легковоспламеняющейся жидкости. Материал труб и фасонных элементов сталь 20. Протяженность магистрали из труб 108х6 мм – 2000 мм. Протяженность магистрали из труб 89х6 мм – 214400 мм. Протяженность магистрали из труб 57х5 мм – 25000 мм. Трубопровод состоит из 90 элементов (участки прямых труб, отводы, переходы). За время эксплуатации не зарегистрировано ни одного отказа его элементов.

Трубопровод находится в эксплуатации с 1985 года. Проведенные при диагностировании замеры толщин показаны в следующей таблице:

Таблица 4.7 - Исходные данные для задачи 4

№ точки	Наименование элемента (первоначальный диаметр и толщина попаспорту, мм)	Отбраковочная толщинаэлемента, мм	Минимальнаяизмереннаятолщинав сечениях, мм
1	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.2
2	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.2
3	Отвод Ø 89х6,0	2.0	5.4
4	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.2
5	Отвод Ø 89х6,0	2.0	5.6
6	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.3
7	Отвод Ø 89х6,0	2.0	5.5
8	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.2
9	Отвод Ø 89х6,0	2.0	5.7
10	Отвод Ø 89х6,0	2.0	5.8
11	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.3
12	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.5
13	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.7
14	Отвод Ø 89х6,0	2.0	5.3
15	Отвод Ø 89х6,0	2.0	5.6
16	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.3
17	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.3
18	Труба Ø 89 х 6.0	2.0	5.1
19	Переход 89х6-57х5	2.0	5.7
20	Переход 89х6-57х5	2.0	4.5
21	Труба Ø 57 х 5.0	1.5	2.9
22	Труба Ø 57 х 5.0	1.5	3,5

№ точки	Наименование элемента (первоначальный диаметр и толщина попаспорту, мм)	Отбраковочная толщинаэлемента, мм	Минимальнаяизмереннаятолщинав сечениях, мм
23	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	3,7
24	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	4,0
25	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2.8
26	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	2.4
27	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	3.8
28	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	3.5
29	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	3.5
30	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	3.3
31	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	3.7
32	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	4.3
33	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	3.3
34	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	3.7
35	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2,0
36	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2,2
37	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	4.1
38	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	2.4
39	Труба Ø 108х6	2,0	4,3
40	Отвод Ø 108х6	2,0	3,9
41	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2,1
42	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	4.0
43	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	2.5
44	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2,4
45	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	4.0
46	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	2.6
47	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2,3
48	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	4.2
49	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	2.7
50	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2,2
51	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	4.1
52	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	2.4
53	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2,2
54	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	4.1
55	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	2.4
56	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2,2
57	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	4.1
58	Отвод Ø 57 x 5.0	1.5	2.4
59	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2.4
60	Труба Ø 57 x 5.0	1.5	2.7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейнеко С.В. Оценка надежности газонефтепроводов. Задачи с решениями. – М.: Издательство «Техника», ТУМА ГРУПП, 2007.–80 с.
2. Зоненко В.И., Шибнев А.В., Яковлев Е.И. Эксплутационная надежность магистральных трубопроводов. – М.: МИНГ им. И.М. Губкина, 1989. – 91 с.
3. Дейнеко С.В. Методика построения моделей надежности газонефтепроводов в Excel. — Надежность, 2009, №2, с.48-55.
4. Рудаченко А.В., Дейнеко С.В., Чухарева Н.В., Байкин С.С. Лабораторный практикум по надежности газонефтепроводов: методические указания. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 135 с.
5. Толстов А.Г. Вибрационная диагностика. Измерительная информатика. Анализ и первичная обработка //Обзор. информ.. Сер. Транспорт и подземное хранение газа. — М.: ИРЦ Газпром, 2001. — 62 с.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — Учебник для вузов. – 4-е изд., стереотипное. — М.: Изд-во "Наука", 1969. — 573 с.
7. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983. — 416 с.
8. Сухарев М.Г. Математическая теория надежности и её инженерные приложения: Учебное пособие. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. – 61 с.