**Министерство строительства
и жилищно-коммунального хозяйства
Российской Федерации**

**Федеральное автономное учреждение
«Федеральный центр нормирования, стандартизации
и оценки соответствия в строительстве»**

Методические указания

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ И ПЕРЕКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Москва 2018 г.

gost.e-ecolog.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ …….. 3
1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ …… 5
2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ …… 5
3 ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ …… 6
4 МЕТОДИКА СБОРА И СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ ПО ПОВРЕЖДЕНИЯМ И АВАРИЯМ ВОДОПРОВОДНЫХ И ВОДООТВОДЯЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ …… 7
4.1 Планирование статистических испытаний – определение объема доверительной информации по отказам трубопроводов …… 9
4.2 Показатели надежности трубопроводов …… 13
4.3 Построение математических моделей надежности трубопроводов …….. 14
4.4 Показатели надежности водопроводных трубопроводов …….. 22
4.5 Показатели надежности безнапорных водоотводящих трубопроводов …… 26
5 ОЦЕНКА И РАНЖИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ВОДОПРОВОДНЫХ И ВОДООТВОДЯЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ …… 29
5.1 Водопроводные трубопроводы ……..…… 29
5.2 Напорные водоотводящие трубопроводы ……..…… 37
5.3 Безнапорные водоотводящие трубопроводы …… 42
6 МЕТОДИКА ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ И ПЕРЕКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ ……..... 48
6.1 Методика выбора объектов восстановления водопроводных трубопроводов …… 49
6.2 Методика выбора объектов восстановления напорных водоотводящих трубопроводов …… 52
6.3 Методика выбора объектов восстановления самотечных водоотводящих трубопроводов …….. 55
7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЗАТРАТ И ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ И ПЕРЕКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ……..... 59
Список использованных источников ……..…….. 63

ВВЕДЕНИЕ

Стратегическое планирование восстановления трубопроводов водоснабжения и водоотведения представляет собой важную государственную задачу для обеспечения их надежности, оценки размеров требуемых инвестиций для модернизации и реконструкции и обоснования тарифа на услуги водоснабжения и водоотведения.

Интенсивность работ по перекладке и реконструкции трубопроводов водоснабжения и водоотведения на большинстве предприятий водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) городов России в настоящее время является недостаточной, имеет место факт старения и износа сетей.

Опыт эксплуатации и анализ зарубежных и отечественных исследований в области оценки надежности и планирования восстановления трубопроводных коммуникаций показали, что принцип работы, заключающийся в проведении ремонтно-восстановительных работ или реконструкции труб только там, где произошла авария (стратегия «пожарной команды»), ведет к застою в области реконструкции сетей. Необходима научно-обоснованная методика выбора объектов реконструкции и перекладки трубопроводов водоснабжения и водоотведения.

Существующая в России нормативно-методическая база в области строительства и эксплуатации коммунальных трубопроводов не содержит каких-либо указаний или рекомендаций в области планирования восстановления трубопроводов.

Методические указания разработаны в развитие положений СП 31.13330.2012 «СНиП 2.04.02–84* Водоснабжение. Наружные сети и сооружения», СП 32.13330.2012 «СНиП 2.04.03–85 Канализация. Наружные сети и сооружения» и СП 272.1325800.2016 «Свод правил системы водоотведения городские и поселковые. Правила обследования и выбора объектов и методов реконструкции» для реализации требований, заложенных в сводах правил, и выполнения грамотного и рационального выбора объектов реконструкции и перекладки трубопроводов водоснабжения и

водоотведения.

Методические указания разработаны для применения специалистами, чья деятельность связана с проектированием, строительством и эксплуатацией централизованных систем водоснабжения и водоотведения, в том числе:

- предприятий водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ),
- государственных и иных органов экспертизы и согласования.

Пособие подготовлено авторским коллективом в составе: к.т.н. Д.Б. Фрог, д.т.н. О.Г. Примин, к.т.н. П.Л. Карасев, к.т.н. Г.П. Варюшина, к.т.н. О.Б. Говоров, Г.Н. Громов, Д.В. Худякова

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Методические рекомендации распространяются на проектирование и эксплуатацию трубопроводов централизованных систем наружного водоснабжения и водоотведения населенных пунктов и объектов народного хозяйства.

2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Федеральный закон от 7 декабря 2011 г. № 416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении»

СП 31.13330.2012 «СНиП 2.04.02–84* Водоснабжение. Наружные сети и сооружения»

СП 272.1325800.2016 «Системы водоснабжения городские и поселковые. Правила обследования и выбора объектов и методов реконструкции»

СП 32.13330.2012 «СНиП 2.04.03–85 Канализация. Наружные сети и сооружения»

ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.502-83 «Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений»

3 ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В Методических указаниях применены следующие термины с определениями [1,2]:

Надежность объекта – участка водопроводного или водоотводящего трубопровода – свойство непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого интервала времени (0; t) при условии, что в момент времени $t = 0$ объект был исправен. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость, или определенные сочетания этих свойств.

Показатель надежности – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Интенсивность отказов участка трубопровода – плотность вероятности возникновения отказа в рассматриваемый момент времени, (то есть риск появления отказа (аварии или повреждения) трубопровода).

Водоснабжение – водоподготовка, транспортировка и подача питьевой или технической воды абонентам с использованием централизованных или нецентрализованных систем холодного водоснабжения.

Водопроводная сеть – комплекс технологически связанных между собой инженерных сооружений, предназначенных для транспортировки воды, за исключением инженерных сооружений, используемых также в целях теплоснабжения;

Водоотведение – прием, транспортировка и очистка сточных вод с использованием централизованной системы водоотведения.

4 МЕТОДИКА СБОРА И СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ ПО ПОВРЕЖДЕНИЯМ И АВАРИЯМ ВОДОПРОВОДНЫХ И ВОДООТВОДЯЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Практика эксплуатации централизованных систем водоснабжения и водоотведения показывает, что нарушения нормального уровня их функционирования связаны в основном с авариями (отказами) на участках трубопроводов сети – наиболее функционально значимых и уязвимых элементов этих систем.

Нарушения работы участков трубопроводов, препятствующие нормальному выполнению заданных функций водоснабжения и водоотведения, обуславливаются различными случайными событиями. Единственным путем оценки возможности появления таких событий, закономерностей их возникновения и повторения являются сбор и обработка статистических сведений по всем авариям и повреждениям трубопроводов, (для самотечных водоотводящих трубопроводов – засоров).

Эти сведения позволяют установить численно вероятность возникновения тех событий, которые могут привести к отказу участка трубопровода и нарушению нормального функционирования водопроводной и водоотводящей сети в целом.

Отказ (авария, повреждение) участка трубопровода может возникнуть в любой момент времени и влечет за собой необходимость ремонтных работ непосредственно с момента возникновения отказа с целью восстановления работоспособности трубопровода.

Основным информационным материалом для статистической обработки эксплуатационных данных по повреждениям и авариям водопроводных и водоотводящих трубопроводов являются данные по эксплуатации ее элементов – участков трубопроводов, а именно:

- данные по отказам (авариям) и восстановлениям участков трубопроводов в распределении по материалам труб, диаметрам и срокам эксплуатации,

- данные по паспортизации и инвентаризации трубопроводов.

Поскольку повреждения и аварии участков труб сети возникают под воздействием случайных факторов, их изучение возможно только на основе сбора, накопления эксплуатационных данных и последующей их обработки статистическими методами. При сборе статистических данных по аварийности трубопроводов за основу получения исходных эксплуатационных данных по отказам (авариям с изливом воды) участков трубопроводов системы, особенно тех, срок службы которых истек, должны приниматься:

- данные по эксплуатации трубопроводов и оборудования, исполнительная документация на участки трубопроводов, карточки-заявления приема заявок по имевшим место авариям за принятый интервал наблюдений, диспетчерский журнал.

В качестве основных случайных величин, исследуемых при оценке надежности участков трубопроводов водопроводной и водоотводящей сети принимаются: число отказов этих элементов в определенный интервал времени, сроки службы их до отказа (наработка на отказ), время восстановления работоспособного состояния участка трубопровода (ликвидации аварии).

Сбор статистических данных по отказам трубопроводов рекомендуется проводить по следующей схеме:

1) изучение исполнительной документации на исследуемые участки трубопроводов – наличие и фиксация дестабилизирующих надежность труб факторов, время возникновения первой аварии и ее причина, а также суммарное время отключения участка на период проведения ремонтно-восстановительных работ;

2) из данных эксплуатации водопроводной и водоотводящей сети, диспетчерских журналов и карточек-заявлений фиксируются статистические данные в виде таблиц, где указываются число аварий участка трубопровода, с разбивкой по материалам труб, диаметрам, годам, вплоть до года его укладки.

Методика статистической обработки эксплуатационных данных по повреждениям и авариям участков трубопроводов водопроводных и водоотводящих трубопроводов состоит из последовательного выполнения трех этапов.

1. Планирование статистических испытаний – определение объема доверительной информации по отказам трубопроводов.

2. Построение математических моделей надежности трубопроводов – выявление эмпирических и теоретических законов распределения отказов и длительности восстановления трубопроводов.

3. Оценка показателей надежности трубопроводов и факторов, формирующих законы их изменения.

4.1 Планирование статистических испытаний – определение объема доверительной информации по отказам трубопроводов.

Одной из главных задач организации и проведения расчетов по оценке надежности трубопроводов является определение объема статистических испытаний – т. е. установление длительности периода, в течение которого необходимо собрать статистические данные по отказам (авариям, засорам) трубопроводов, чтобы получить достоверные оценки показателей их надежности.

Интервал времени эксплуатации трубопроводов, за который должны быть собраны статистические данные по их отказам, рекомендуется определять на основании плана определительных испытаний, регламентированного ГОСТ 27.502-83 «Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений» [2].

За основу при определении характеристик объема доверительной информации следует принимать план типа (N, R, r) для восстанавливаемых элементов, где:

N – количество элементов, поставленных под наблюдение (в данном случае протяженность водопроводных или водоотводящих трубопроводов, км),

R – планы, в которых отказавшие элементы ремонтируются, или заменяются новыми,

r – число отказов труб или предельных состояний, до возникновения которых проводятся наблюдения.

Планирование определительных испытаний участков трубопроводов дает возможность с заданной достоверностью результатов (доверительная вероятность – α) и их точностью (относительная предельная ошибка – σ), определить характеристики объема испытаний (число отказов – r, длительность испытаний – T_u и т.д.).

Следует отметить, что планирование определительных испытаний можно провести в случае, если установлены законы распределения исследуемых величин. Установлено, что изменение числа отказов водопроводных и водоотводящих трубопроводов во времени, в пределах допускаемой ошибки, подчиняются закону распределения Пуассона. Поэтому в качестве исходной математической модели рекомендуется принять этот закон [4,5].

При этом учитывалось, что для восстанавливаемых элементов, у которых поток отказов простейший, т. е. случайное число отказов распределено по закону Пуассона, промежутки времени между последовательными отказами (наработка на отказ) имеют экспоненциальное распределение.

В этой связи планирование статистических испытаний проводится исходя из экспоненциального закона распределения наработок на отказ.

Согласно методике проведения определительных испытаний [3] объем доверительной выборки равен:

$$NT_u = \frac{r}{a_3} \cdot T_0, \qquad (4.1)$$

где N – количество элементов, или их протяженность в км,

a_3 – доверительная граница по T_0 снизу, T_0 – ожидаемая величина наработки на отказ.

Требуемое фиксированное количество отказов r определяется следующим образом. По значению коэффициента, характеризующего доверительную границу опытной наработки на отказ сверху, которая равна $a_1 = 1 + \sigma$ и значению доверительной вероятности α по [5], находим значения необходимого количества отказов r, которые приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения количества отказов r

α / a_1	0,8	0,9	0,95
1,05	300	600	1000
1,10	80	200	300
1,15	45	90	150
1,20	25	50	80

Данные, представленные в таблице 4.1, позволяют определить расчетное число отказов в зависимости от предельной относительной погрешности σ и значения доверительной вероятности α.

По известному значению r, находим значения коэффициента a_3, для различных значений доверительной вероятности α. Результаты расчета приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения коэффициента a_3

α	a[3] / r			
0,8	0,95 / 300	0,91 / 80	0,875 / 90	0,84 / 150
0,9	0,95 / 600	0,92 / 300	0,875 / 90	0,84 / 150
0,95	0,95 / 1000	0,91 / 300	0,88 / 150	0,84 / 80

По данным статистических исследований изменения аварийности трубопроводов, значения ожидаемых величин интенсивности отказов $\lambda(t)$ для участков трубопроводов изменяются в основном в пределах:

$$\lambda(t)_{min} = 0{,}05 \ \ 1/\text{г. км.}, \qquad \lambda(t)_{max} = 4 \ \ 1/\text{г. км.},$$

что эквивалентно величинам наработки $T_{0_{min}} = 0{,}25$ года ≈ 2200 час, $T_{0_{max}} = 10$ лет ≈ 87600 часов. Таким образом, имея значения r, a_3, T_0 по формуле (4.1) определяем необходимый объем испытаний. Результаты вычислений приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Объем испытаний $N \cdot T_u$ (час, км)

σ	a_3	α		
		0,8	0,9	0,95
0,05	0,95	$0{,}695 \cdot 10^6$–$2{,}76\ 10^7$	$1{,}39\ 10^6$–$5{,}52\ 10^7$	$2{,}32\ 10^6$–$9{,}2\ 10^7$
0,10	0,91	$1{,}94\ 10^5$–$7{,}7\ 10^6$	$4{,}84\ 10^5$–$1{,}93\ 10^7$	$7{,}25\ 10^6$–$2{,}88\ 10^7$
0,15	0,875	$1{,}13\ 10^6$–$4{,}5\ 10^6$	$2{,}26\ 10^5$–$0{,}9\ 10^7$	$3{,}75\ 10^5$–$1{,}49\ 10^7$
0,20	0,84	$0{,}655\ 10^5$–$2{,}6\ 10^6$	$1{,}13\ 10^5$–$0{,}524\ 10^7$	$2{,}09\ 10^5$–$0{,}834\ 10^7$

Используя данные таблицы 4.2 и задавая значение доверительной вероятности α = 0,95, характерной для инженерных расчетов, и значение

относительной ошибки $\sigma = 0{,}10$, определим расчетное число отказов $r = 300$, а из таблицы 4.3 значение коэффициента $a_3 = 0{,}91$. Далее, задавая значения ожидаемых наработок на отказ и протяженности трубопроводов, по формуле (4.1) вычисляем значение требуемой длительности статистических испытаний $T_u = 1{,}05\ 10^5 = 12$ лет.

4.2 Показатели надежности трубопроводов

Под надежностью объекта (например, участка трубопровода) понимается его свойство непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого интервала времени $(0;t)$ при условии, что в момент времени $t = 0$ объект был исправен [5].

Различают работоспособное и неработоспособное состояния объекта. Работоспособное – это такое состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять объектом заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. Если хотя бы один из таких параметров выходит за пределы требований документации, то такое состояние объекта теоретически считается неработоспособным.

Переход объекта из работоспособного состояния в неработоспособное в теории надежности принято называть отказом. Таким образом, отказ – это случайное событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

Функция надежности $p(t)$. Эта функция (иногда ее называют просто «надежность») определяется как вероятность события, состоящего в том, что элемент (участок трубопровода) безотказно действует в течение интервала $(0,t)$ при условии, что при $t = 0$ он был работоспособен.

Если известна функция плотности распределения вероятности безотказной работы $f(t)$, то функция надежности, может быть найдена по формуле:

$$p(t) = \int_{t}^{\infty} f(t)dt . \qquad (4.1)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$. Под интенсивностью отказов понимается вероятность возникновения отказа элемента в единицу времени при условии, что до времени t он был в работоспособном состоянии. Связь интенсивности отказов с $f(t)$ и $p(t)$ определяется выражением:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}. \qquad (4.2)$$

Иногда интенсивность отказов называют функцией риска. Через известную интенсивность отказов $\lambda(t)$ могут быть выражены функция плотности распределения вероятности до отказа $f(t)$ и функция надежности $p(t)$ элемента:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_{0}^{t} \lambda(t)dt}, \qquad (4.3)$$

$$p(t) = e^{-\int_{0}^{t} \lambda(t)dt} . \qquad (4.3)$$

Среднее время наработки до отказа T_p определяется как математическое ожидание случайного времени безотказной работы. При известной $f(t)$, T_p находится по выражению:

$$T_p = \int_{0}^{\infty} t \cdot f(t)dt . \qquad (4.4)$$

Среднее «время жизни» элемента связано с его функцией надежности $p(t)$ выражением:

$$T_p = \int_{0}^{\infty} p(t)dt , \qquad (4.5)$$

для экспоненциального распределения среднее время наработки до отказа $T_p = 1/\lambda_0$, т.е. численно равно величине, обратной интенсивности отказов.

4.3 Построение математических моделей надежности трубопроводов

Подбор математической модели – функции плотности распределения случайной величины $f(x)$ – числа отказов объекта (участка трубопровода) включает:

1) вычисление статистических оценок случайной величины;

2) собственно подбор вида функции $f(x)$;

3) проверка гипотезы об адекватности подобранной функции данным выборки.

Вычисление статистических оценок случайной величины.

Положим, имеется выборка, содержащая n зафиксированных значений случайной величины X : $x_1, x_2, \ldots x_n$. Тогда оценка математического ожидания этой случайной величины $\tilde{m}_x$ рассчитывается как среднее значение наблюденных данных, по выражению:

$$\tilde{m}_x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \,. \tag{4.6}$$

Формула для оценки дисперсии $\tilde{D}_x$ имеет вид:

$$\tilde{D}_x = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \tilde{m}_x)^2 \,, \tag{4.7}$$

Оценка значения средне-квадратического отклонения $\tilde{\sigma}_x$ определяется по выражению:

$$\tilde{\sigma}_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \tilde{m}_x)^2} \,. \tag{4.8}$$

Оценка коэффициента асимметрии $\tilde{\gamma}_x$ рассчитывается так:

$$\tilde{\gamma}_x = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(x_i - \tilde{m}_x)^3}{(n-1)(n-2)(\tilde{\sigma}_x)^3} \,. \tag{4.9}$$

Подбор функции плотности распределения вероятностей $f(x)$ случайной переменной по ее наблюденным значениям $x_1, x_2, \ldots x_n$ осуществляется последовательным выполнением следующих процедур [5].

а) Строится статистический ряд случайной величины X (числа отказов участков трубопроводов). С этой целью весь диапазон наблюденных значений (от самого малого до самого большого) подразделяется на несколько интервалов (не обязательно равных) и подсчитывается, какое количество данных попадает в каждый интервал.

б) Полученный статистический ряд представляется графически в виде гистограммы (статистическое распределение). По горизонтальной оси гистограммы последовательно, по мере их возрастания откладываются интервалы изменения экспериментальных значений, на каждом из которых, как на основании, строится прямоугольник с площадью, равной частоте попаданий наблюденных значений именно в этот интервал.

в) На основании визуального анализа гистограммы подбирается теоретическая функция распределения $f(x)$, график которой «сглаживает» гистограмму (иначе – выдвигается гипотеза относительно вида закона распределения). Чаще всего, в качестве такой функции выбирают один из известных законов плотности распределения случайных величин, например, нормальный, экспоненциальный, закон Вейбулла [4,5].

г) Выдвинутая гипотеза относительно функции $f(x)$ проверяется на соответствие исходным наблюденным данным по критерию согласия.

В основе критерия согласия лежит случайная выборка, т. е. наблюденные значения представляют собой результаты случайного выбора. Этот критерий зависит от характеристик выборочного распределения, которое возникает, если множество значений является результатом случайной выборки. В этих условиях разность между наблюденными и ожидаемыми значениями приписывается случаю, т. е. выборочной ошибке.

Для выявления «согласия» между подобранной функцией $f(x)$ и статистическим распределением изначально выдвигается гипотеза (называемая нулевой), состоящая в предположении, что нет существенного различия между двумя распределениями (наблюденных и теоретически ожидаемых результатов), а любое зафиксированное расхождение случайно и объясняется лишь выборочной ошибкой, т. е. ограниченностью числа наблюдений исследуемой случайной величины.

При решении подобных задач рекомендуется использовать критерий χ^2 или, иначе, критерий согласия Пирсона. Количественной мерой расхождения между гистограммой и сглаживающей ее функцией $f(x)$ в этом случае считается величина так называемой статистики $\hat{X}^2$, рассчитываемой по выражению:

$$\hat{X}^2 = \sum_{i=1}^{l} \frac{(\gamma_i - nP_i)^2}{n \cdot P_i}; \qquad (4.10)$$

где l – число событий, по которым определяется мера $\hat{X}^2$;

γ_i – число отказов, попавших в i-й интервал;

nP_i – математическое ожидание числа отказов в i-м интервале при принятой гипотезе.

Гипотеза H_0 принимается, если выполняется условие:

$$\hat{X}^2 \le X_l^2(K), K = l\text{-}1\text{-}c, \qquad (4.11)$$

здесь c – число параметров распределений, оцениваемых по той же статистике.

Исходный статистический материал по отказам и восстановлениям участков трубопроводов исследуемой водопроводной или водоотводящей сети должен быть собран за расчетный (на основании планирования статистических испытаний) промежуток эксплуатации и систематизирован для каждого диаметра и материала труб.

Доверительный интервал для показателей надежности принимается в зависимости от принятого предположения о законе распределения

исследуемого события (частоты отказов, времени между отказами, среднего времени восстановления) объема наблюдений и стандартного отклонения σ с уровнем значимости $\alpha = 0{,}05$.

Обработка исходного материала необходимо вести в последовательности:

- составляются вариационные ряды времени наработок между отказами, $T_1, T_2, ..., T_i$ и времени восстановления $t_в^{(1)}, t_в^{(2)}, ..., t_в^{(i)}$ участков трубопроводов и строятся гистограммы частот исследуемых случайных величин;

- по критерию согласия $\hat{X}^2$ проверяется степень согласованности статистических (эмпирических) и теоретических распределений T или $\bar{t}_в$, (наработок на отказ и среднего времени восстановления) [5, 9, 10]. В качестве теоретических распределений рекомендуется использовать экспоненциальный закон и распределение Эрланга;

- определяются численные показатели надежности участков трубопроводов в распределении по величине диаметра и материала труб.

Предварительно необходимо проводить проверку однородности данных о наработках на отказ участков трубопроводов. Проверка однородности выполняется по критерию t, который имеет распределение Стьюдента с $K = n - 2$ степенями свободы [5,8].

$$t = \frac{J_{nj}\sqrt{nj(n-2)}}{\sqrt{n - nj - nj(J_{nj})}}; \qquad (4.12)$$

J_{nj} – наибольшие отклонения средней подгруппы от общей средней

$$J_{nj} = \frac{\bar{x} - \bar{x_j}}{s}$$

n – объем выборки;

n_j – объем j-й подгруппы;

s – среднее квадратическое отклонение данных в выборке.

Для примера в таблице 10 приведены результаты проверки однородности данных о наработках на отказ участков трубопроводов

Московского водопровода. При построении гистограмм – статистического аналога плотности распределения наработки на отказ участка водовода или сети, значения $\hat{f}(t_1), \hat{f}(t_2), ..., \hat{f}(t_i)$ вычисляются по формуле:

$$\hat{f}(t_i) = \frac{\gamma_i}{n \cdot t_i}; \qquad (4.13)$$

где t_i – длина i-го интервала.

Число разбиения K вариационного ряда определяется по выражению:

$$K = 1 + 3{,}3 lg n;$$

Плотность теоретического распределения наработки на отказ вычисляется по формуле:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}; \qquad (4.14)$$

где $\lambda = \frac{1}{T_0}$;

T_0 – среднее время наработки на отказ участка водовода или сети.

Таблица 10 – Результаты проверки однородности данных о наработках на отказ участков стальных трубопроводов Московского водопровода, Д = 100 мм

H_0 – нулевая гипотеза: данные однородны.

Характеристика объекта	Данные о T_j (годы, трубы стальные Д = 100 мм)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n = 48$	0,4	1,6	1,3	0,46	1,6	0,7	0,86	1,15	1,15
	0,35	1,5	2,4	0,79	3	0,96	1	1,5	1,1
$\bar{x} = 1{,}08$	0,35	1,6	1,5	0,7	1,6	0,76	1,2	1,3	0,9
	0,3	0,9	1,1	0,65	1,6	0,77	0,8	1	
	0,36	1,4	1,3	0,8	1,2	0,8	0,97	1,15	
n_j	5	5	5	5	5	5	5	5	3
$\bar{x}$	0,35	1,4	1,52	0,68	1,8	0,8	0,96	1,22	0,75

$S^2 = 0{,}212$, $S = 0{,}46$

$$t = \frac{J_{nj}\sqrt{n_j(n-2)}}{\sqrt{n - n_j - n_j \cdot J_{nj}}} = 1.339,$$

$$K = n - 2 = 46 \qquad t_\alpha(K) = 2{,}0129, \alpha = 0{,}05$$

Вывод: $t > t_\alpha(K)$, 1,339 < 2,0129. H_0-гипотеза не отвергается.

В таблице 11 приведены результаты проверки гипотезы о распределении наработки на отказ по экспоненциальному закону. Приведенные оценки показывают, что нулевая гипотеза H_0 не отвергается.

Доверительный интервал для оценки средней наработки на отказ участка водовода или сети $\overline{T}_0$ определялся по неравенству:

$$T_0 - t\frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \overline{T}_0 < T_0 + t\frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \qquad (4.15)$$

где t – табулированное значение критерия Стьюдента, взятого при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и числа степеней свободы $K = n - 1$.

Таблица 11 - Проверка гипотезы о законе распределения наработки на отказ участков чугунных трубопроводов Московского водопровода Д = 100 мм

H_0 – нулевая гипотеза: закон экспоненциальный.

Характеристика объекта	l	ΔT	γ_i	P_i	$n \cdot P_i$	$\gamma_i - n \cdot P_i$	$\frac{(\gamma_i - n \cdot P_i)^2}{n \cdot P_i}$
Трубы чугунные	1	0–2	20	0,53	24,4	–4,4	0,79
Д = 100 мм	2	2–4	8	0,3	13,1	–3,8	1,04
	3	4–6	5				
			13				
T_0 = 4,66 год	4	6–8	4	0,17	7,82	5,2	3,45
λ = 0,21	5	8–10	3				
n = 43	6	10–12	6				
			13		Итого:		5,28

$$K = 1 + 3{,}3 lg n = 6 \qquad n = \sum_{i=1}^{l} \gamma_i = 43$$

$$X^2_{\text{Набл.}} = 5{,}28 \qquad X^2_{0{,}05}(2) = 5{,}991\text{, т.е. } X^2_{\alpha}(n) > \bar{X}^2_{\text{Набл.}}$$

Вывод: H_0-гипотеза не отвергается.

Задача статистической обработки данных о продолжительности восстановления участков трубопроводов заключается в проверке однородности данных, построении эмпирической функции распределения времени восстановления (ликвидации аварии) $t_в$, аппроксимации полученной функции теоретическим законом распределения случайных величин.

В общем виде плотность распределения потока восстановлений по закону Эрланга 2 порядка описывается по формуле:

$$f(\tau) = 4\frac{\tau}{t_в^2} \cdot \exp\left(-\frac{2\tau}{t_в}\right); \tag{4.16}$$

а функция распределения времени восстановления оценивается по формуле:

$$F(\tau) = \int_0^{\tau} \frac{4\tau}{\bar{t}в} e^{-2\tau/t_в} dt, \tag{4.17}$$

где $\bar{t}_в$ – среднее время восстановления участка сети (час).

Для этого распределения среднее время восстановления находится в пределах:

$$t_в - t\frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \bar{t}_в < t_в + t\frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \tag{4.18}$$

где $\bar{t}_в$ – среднее время восстановления, (оценивалось как средневзвешенная величина);

В таблице 12 приведен пример проверки гипотезы о распределении времени восстановления участков водопроводных трубопроводов по закону Эрланга – 2-го порядка.

Таблица 12 – Проверка гипотезы о распределении времени восстановления участков трубопроводов Московского водопровода (стальные трубы)

H_0 – гипотеза. Закон Эрланга – 2-го порядка

Интервалы (час.)	γ_i	P_i	$n \cdot P_i$	$\gamma_i - n \cdot P_i$	$(\gamma_i - n_i P_i)^2$	$n \cdot P_i$
0–5	20	0,26	24	4	16	0,6
5–10	42	0,35	34	8	64	1,8
10–15	9	0,25	23			
15–20	7			7	49	2,1
	16					
20–25	7					
25–30	4	0,11	10	1	1	0,1
	11					
30–35	3					
35–40		0,05	5	3	9	1,8
40	5					
	8					
Итого:	96	1	96			6,4

$n = 96$ $\quad K = n - 1 = 5 - 1 = 4$

$X^2_{0,05}(4) = 9{,}4$ $\alpha = 0{,}05$, т.е. $X^2_{\alpha}(K) > X^2_{\text{Набл}}$ – гипотеза не отвергается.

$t_в - t\frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \bar{t}в < tв + t\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$; $\quad 15 - 4 < \bar{t}_в < 15 + 4$; $\quad 11 < \bar{t}в < 19$

Оценка параметров функций распределения числа отказов участков трубопроводов позволяет на практике прогнозировать число отказов и вероятность их возникновения. Приведенная методика обработки статистических данных по отказам и восстановлениям водопроводной сети

положена в основу алгоритма оценки показателей надежности трубопроводов водопроводной и водоотводящей сети.

4.4 Показатели надежности водопроводных трубопроводов.

Количественно надежность участков трубопроводов городской водопроводной сети определяется вероятностными характеристиками и показателями:

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов (1/год·км.)

$t_в$ – среднее время восстановления (ликвидации аварии), (час)

$T_о$ – среднее время работы элемента (участка трубопровода) между отказами (наработка на отказ), (год)

$P(t)$ – вероятность безотказной работы участка трубопровода в интервале времени t.

$Q(t) = 1 - P(t)$ – вероятность возникновения отказа участка трубопровода в интервале времени t.

Все численные показатели надежности связаны со временем. Для вычисления и сравнения показателей надежности необходимо, чтобы они были приведены к одному и тому же интервалу времени.

Интенсивность отказов участка трубопровода – $\lambda(t)$ характеризует плотность вероятности возникновения отказа в рассматриваемый момент времени, (то есть риск появления отказа (аварии или повреждения) трубопровода). Интенсивность отказов участков трубопроводов определяется по результатам сбора и статистической обработки эксплуатационных данных об их отказах по выражению:

$$\lambda(t) = \frac{\sum n(t)}{t \sum L}, \tag{4.19}$$

где: $\sum n$ – количество отказов участка трубопровода определенного материала и диаметра за период времени наблюдения t,

$\sum L$ – суммарная длина участка трубопровода определенного материала и диаметра.

После периода восстановления (ремонта) участка может произойти его следующий отказ и т. д., т. е. отказы каждого участка происходят во времени совершенно случайно, образуя поток случайных событий. Вид потока отказов определяет методы расчета показателей надежности.

Поэтому для оценки показателей надежности участков трубопроводов в процессе обработки исходных статистических данных по их эксплуатации необходимо найти опытные статистические закономерности распределения рассматриваемых случайных величин и установить, какому из теоретических законов распределения они ближе всего соответствуют. Использование законов распределения позволяет применять известные аналитические методы определения показателей надежности [4,5].

Для трубопроводов городских сетей водоснабжения в качестве математической модели, описывающей закон распределения потока отказов их участков и позволяющей на практике прогнозировать число отказов и вероятность их возникновения может быть принят простейший поток случайных событий, описываемый законом Пуассона.

Вероятность того, что в течение интервала времени t произойдет ровно n отказов участка трубопровода, оценивается из выражения:

$$P_{n(t)} = \frac{\lambda \cdot t}{n!} e^{-\lambda t}, \tag{4.20}$$

где λ – интенсивность отказов участка трубопровода определенной длины, материала и диаметра в единицу времени.

Вероятность того, что в интервале времени t не будет ни одного отказа участка трубопровода длиной L (надежность участка трубопровода) определяется по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda t L}. \tag{4.21}$$

Как правило, функция распределения времени безотказной работы участков трубопроводов водопроводной сети городов согласуется с экспоненциальным законом распределения и время безотказной работы

участка трубопровода (наработка на отказ) длиной L описывается следующим выражением:

$$T_0 = \int_0^\infty P(t)dt = \frac{1}{\lambda L}. \quad (4.22)$$

Трубопроводы городской водопроводной сети относятся к восстанавливаемым системам массового обслуживания, которые по мере появления отказов их элементов ремонтируются. Возврат водопроводной сети в работоспособное состояние происходит под воздействием потока восстановлений (ремонтов) трубопроводов. Результаты статистических исследований по оценке среднего времени восстановления (ликвидации аварии) $t_в$ для участков трубопроводов водопроводной сети ряда городов РФ показали, что продолжительность восстановления этих элементов описывается законом распределения:

$$F(t) = 1 - e^{-mt}, \quad (4.23)$$

где m – интенсивность восстановления

$$m = \frac{1}{t_в}, \quad (4.24)$$

$t_в$ – среднее время восстановления (ремонта) участка трубопровода.

Данная функция характеризует вероятность восстановления участка трубопровода в заданное время, в частности, в период времени предусмотренный СП 31.13330.2012 «СНиП 2.04.02–84* Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» [6].

При наличии достаточных статистических данных о фактическом времени восстановления участков трубопроводов значение $t_в$ определяется по формуле:

$$t_в = \frac{\sum t_в}{n} \quad (4.25)$$

где $t_в$ – продолжительность восстановления i-ого участка водопроводной сети, n – число отказов участков трубопроводов.

Оценка и контроль показателей надежности трубопроводов позволяет фиксировать фактический уровень надежности и риска от отказов труб, соответствующий существующему техническому состоянию водопроводных

и трубопроводов, организации их технического обслуживания и интенсивности обновления. Кроме того, анализ уровня надежности трубопроводов различных сроков службы, позволяет определить те из них, которые имеют наибольший риск возникновения аварий и для которых необходимо провести анализ причин высокой аварийности и в конечном итоге принимать решения по повышению их надежности. Номенклатура и оценка показателей надежности напорных водоотводящих трубопроводов аналогична водопроводным.

4.5 Показатели надежности безнапорных водоотводящих трубопроводов

Под отказом безнапорных водоотводящих трубопроводов понимается ситуация, когда по каким-либо причинам (например, в результате аварии или засора) пропускная способность водоотводящей сети становится меньше поступающих в нее объемов сточных вод. Физически отказ проявляется в выливании неочищенной воды на поверхность или через аварийные водовыпуски. С точки зрения теории надежности функционирование городской водоотводящей сети представляется как марковский случайный процесс с непрерывным временем и двумя состояниями: S_1 – когда система работает нормально и S_2 – когда на сети производятся ремонтные работы. Переход из S_1 в S_2 происходит под воздействием потока отказов, а обратный переход из S_2 в S_1 – под воздействием потока восстановлений. Под потоком понимается последовательность однородных событий, происходящих в произвольные моменты времени [4,7].

Время между двумя последующими отказами участков водоотводящей сети t есть непрерывная случайная величина, которая может быть описана плотностью распределения вероятностей (дифференциальным законом распределения) $f(t)$. Функция $f(t)$, получаемая на практике путем обработки данных наблюдений о состоянии участка, полностью определяет все параметры потока и, в частности, его важнейшую характеристику - интен-

сивность λ, которая в общем случае зависит от времени, т. е. $\lambda = \lambda(t)$. Связь между $f(t)$ и $\lambda(t)$ определяется уравнением [7]:

$$\int_t^{\infty} f(t)dt = exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]. \quad (4.26)$$

Знание функции $f(t)$ (либо $\lambda(t)$) позволяет ввести в рассмотрение количественные показатели надежности, которые подразделяются на временные и числовые. В качестве временного показателя используется функция надежности $p(t)$, определяемая выражением:

$$p(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt, \quad (4.27)$$

а числового – математическое ожидание T_0 случайной величины t:

$$T_0 = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} p(t)dt. \quad (4.28)$$

Физический смысл этих показателей состоит в следующем: функция надежности численно равна вероятности безотказной работы водоотводящих трубопроводов в фиксированный момент времени t, отсчитываемый от предшествующего отказа, а T_0 – среднее время работы между двумя последующими отказами. Установлено, что для инженерных расчетов надежности сложных, многокомпонентных систем чаще всего адекватной оказывается модель простейшего (или стационарного пуассоновского) потока отказов, для которого функция $f(t)$ имеет вид:

$$f(t) = \lambda_0 c^{-\lambda_0 t}; (t \geq 0) \quad (4.29)$$

где λ_0 – интенсивность потока, являющаяся для этого случая величиной постоянной и связанная со средним временем безотказной работы соотношением:

$$T_0 = 1/\lambda_0 \quad (4.30)$$

Методика рекомендует в качестве математического описания потока отказов трубопроводов водоотводящей сети принимать пуассоновский поток. Возврат сети в работоспособное состояние (в терминах теории надежности) происходит под воздействием потока восстановлений. Аргументы, аналогичные приведенным выше, дают основание предполагать, что поток восстановлений системы также простейший, характеризуемый

интенсивностью μ_0. Интенсивность потока восстановлений μ_0 есть величина, обратная среднему времени одного ремонта системы по ликвидации отказа T_p .

Экспериментальное определение значений λ_0 и μ_0 сводится к нахождению по известным методикам [4, 5] величин T_0 и T_p путем обработки данных наблюдений состояния водоотводящих трубопроводов за длительное время. При известных значениях λ_0 и μ_0 финальная вероятность функционирования водоотводящей сети в безаварийном режиме:

$$p(S_1) = \mu_0/(\lambda_0 + \mu_0). \quad (4.31)$$

Определением $p(S_1)$ завершается первый этап исследования надежности водоотводящей сети – ее анализ. Следующий шаг состоит в разработке мероприятий по повышению надежности, их оценке с точки зрения экономической эффективности и осуществление этих мероприятий на конкретном объекте.

5 ОЦЕНКА И РАНЖИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ВОДОПРОВОДНЫХ И ВОДООТВОДЯЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ

5.1 Водопроводные трубопроводы

Для определения потенциально опасных с точки зрения их надежности и технического состояния участков трубопроводов рекомендуется использовать полученную на практике и дополненную теоретическими выкладками по рейтингам или баллам значимости следующую последовательность ранжирования дестабилизирующих надежность труб факторов:

- материал труб и его качество (5–100 баллов);
- наличие и качество изоляционного покрытия (4–100 баллов);
- отсутствие защиты от электрокоррозии (в т. ч. наличие блуждающих токов и коррозионной активности грунта, 2–100 баллов);
- возраст трубопроводов (4–100 баллов);
- диаметр трубы (1–100 баллов);
- наличие и глубина залегания подземных вод (8–100 баллов);
- гидравлические показатели (величина и динамика изменения напоров в сети, скоростей течения, 2–100 баллов);
- интенсивность транспортных и пассажиропотоков (5–100 баллов);
- глубина залегания труб (4–100 баллов);
- число уже прошедших аварий (повреждений) на участке (2–100 баллов);
- тип грунта (грунтовые условия, 5–100 баллов);
- качественные характеристики транспортируемой воды (3–100 баллов).

Количественная оценка элементов состояния каждого фактора представлена в паспорте ранжирования для водопроводных сетей в виде баллов значимости (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Паспорт ранжирования по балльной системе участков водопроводной сети

Внешние факторы и элементы их состояния	Баллы значимости
Материал труб и его качество	
- трубы из асбестоцемента	**100**
- чугунные	**20**
- стальные	**18**
-ПВХ	**15**
-ПЭ	**7**
- ВЧШГ	**6**
- железобетонные	**5**
Наличие и качество изоляционного покрытия	
Наличие внешнего покрытия	
1) удовлетворительное состояние внешнего покрытия	**55**
2) неудовлетворительное состояние внешнего покрытия;	**100**
Наличие внутреннего покрытия	
3) удовлетворительное состояние внутреннего покрытия	**55**
4) неудовлетворительное состояние внутреннего покрытия;	**100**
При одновременном наличии внешнего и внутреннего покрытий:	Если (1) и (3) принять **3** Если (1) и (4) принять **55** Если (2) и (3) принять **55** Если (2) и (4) принять **100**
Отсутствие защиты от электрокоррозии	
- отсутствие СКЗ	**100**
- наличие СКЗ и неэффективная ее работа	**51**

- наличие СКЗ и эффективная ее работа	**2**		
Возраст трубопроводов (год укладки)			
- чугунные трубы (годы):			
1-4	**15**		
5-10	**10**		
11-15	**4**		
16-20	**30**		
21-25	**45**		
26-30	**60**		
31-35	**70**		
36-40	**85**		
41 и более	**100**		
- стальные трубы:			
1-4	**20**		
5-10	**10**		
11-15	**4**		
16-20	**35**		
21-25	**45**		
26-30	**65**		
31-35	**75**		
36-40	**90**		
41 и более	**100**		
Диаметр трубопровода, мм	**Сталь**	**Чугун**	**ВЧШГ**
100	**100**	**100**	**100**
200	**99**	**40**	**20**
300	**22**	**23**	**10**
400	**17**	**18**	**9**
500	**11**	**12**	**8**
600	**9**	**10**	**5**

700	**7**	**8**	**4**
800	**5**	**6**	**3**
900	**2**	**3**	**1**
1000 и более	**1**	**1**	**1**
Наличие и глубина залегания подземных вод			
-при напоре воды **свыше 4 м** и наличии минерализованных вод	**100**		
- то же при наличии слабоминерализованных вод	**75**		
- то же при наличии пресных вод	**50**		
-при напоре воды **от 3 до 4 м** и наличии минерализованных вод	**95**		
- то же при наличии слабоминерализованных вод	**70**		
- то же при наличии пресных вод	**45**		
-при напоре воды **от 2 до 3 м** и наличии минерализованных вод	**90**		
- то же при наличии слабоминерализованных вод	**65**		
- то же при наличии пресных вод	**40**		
-при напоре воды **от 1 до 2 м** и наличии минерализованных вод	**85**		
- то же при наличии слабоминерализованных вод	**60**		
- то же при наличии пресных вод	**35**		
-при напоре воды **менее 1 м** и наличии минерализованных вод	**80**		
- то же при наличии слабоминерализованных вод	**55**		
- то же при наличии пресных вод	**30**		
Отсутствие подземных вод	**7**		
Отсутствие сведений о подземных водах	**54**		
Гидравлические показатели			
а) При величинах давлений воды:			

до 20 м вод. ст.	**2**
от 21 до 30 м вод. ст.	**40**
от 31 до 40 м вод. ст.	**60**
Более 40 м вод. ст.	**100**
б) При наличии сведений о скоростях течения, давлений воды, а также с учетом длин участков трубопровода и диаметров (внимание: при давлении более 40 м расчет ведется только по пункту А).	
Интенсивность транспортных и пассажиропотоков	
Высокая:	
- с расположением участка до кромки дорожного полотна до 20 м	**100**
- то же от 20 до 50 м	**80**
- то же от 50 до 20 м	**60**
Средняя:	
- с расположением участка до кромки дорожного полотна до 10м	**50**
-тоже от 10 до20м	**40**
- то же от 20 до 50 м	**30**
Низкая:	
- на проезжей части	**10**
- на газоне	**5**
Глубина залегания	
менее 2 м	**100**
от 2 до 4 м	**52**
более 4 м	**4**
Число уже прошедших аварий (повреждений) на участке	Назначается согласно таблице 5.2

Грунтовые условия (оценка по 4 уровням – ***а, б, в*** и ***г*** с выбором максимального значения из них)	
а) преобладающий тип грунта:	
- суглинок	**5**
- сухой песок	**20**
- сухой пылевидный грунт	**35**
- сухой пылевидный грунт с глинистыми включениями	**50**
- влажный песок	**65**
- влажный пылевидный грунт	**80**
- влажный пылевидный грунт с глинистыми включениями	**90**
-глина	**100**
б) степень коррозионного состояния грунта (через удельное электрическое сопротивление)	Назначается согласно таблице 5.3
в) степень коррозионного состояния грунта (по плотности поляризационного тока)	Назначается согласно таблице 5.4
г) степень коррозионного состояния грунта (по потери масса образца)	Назначается согласно таблице 5.5
Качественные характеристики транспортируемой воды	**Промежуточные баллы**
а) pH более 7,2	**25**
pH 7,2 и менее	**1**
б) концентрация железа более 0,2 мг/л	**20**
концентрация железа 0,2 мг/л и менее	**1**
в) концентрация растворенного кислорода более 10 мг/л	**20**
концентрация растворенного кислорода 10 мг/л и менее	**0**

г) концентрация остаточного хлора более 0,3 мг/л	**20**
концентрация остаточного хлора 0,3 мг/л и менее	**0**
д) концентрация хлоридов более 30 мг/л	**5**
концентрация хлоридов 30 мг/л и менее	**0**
е) концентрация сульфатов более 50 мг/л	**5**
концентрация сульфатов 50 мг/л и менее	**0**
ж). концентрация карбонатов более 30 мг/л	**5**
концентрация карбонатов 30 мг/л и менее	**0**
Суммарный рейтинг по качественным показателям:	**Сумма значений столбца 3**

Таблица 5.2 – Рейтинговые значения по признакам аварийной ситуации

Косвенный признак аварийной ситуации	Рейтинговые значения, балл	
	Без учета сведений об утечках	С учетом сведений об утечках
Выбивание (излив) воды из земли, из под асфальта, на газоне, у бордюрных камней и в	**100**	**100**
Затопление водой подвалов	**50**	**45**
Поступление воды в канал тепловой сети	**45**	**40**
Подтопление водой колодцев и каналов	**15**	**10**
Затопление водой коллекторов	**10**	**8**
Наличие воды в подполье ЦТП и	**10**	**8**
Затопление водой раскопки, котлована,	**9**	**7**
Затопление водой телефонных кабелей	**9**	**7**
Снижение давления воды перед	**7**	**6**
Заполнение водой смотровых колодцев	**5**	**4**
Поступление воды в пешеходные переходы	**2**	**2**

Таблица 5.3 – Коррозионная активность грунтов по отношению к углеродистой стали в зависимости от их удельного электрического сопротивления

	Удельное электрическое сопротивление грунта, Ом.м			
	Свыше 50	От 20 до 50	Свыше 20	До 5
Показатель коррозионной активности	Низкая	Средняя	Высокая	Весьма высокая
Рейтинговое значение	**5**	**40**	**70**	**100**

Таблица 5.4 – Коррозионная активность фунтов по отношению к углеродистой стали в зависимости от плотности поляризующего тока

	Средняя плотность поляризующего тока, мА/см^2				
	До 0,05	От 0,05 до 0,2	От 0,2 до 0,3	От 0,3 до 0,4	Свыше 0,4
Показатель коррозионной активности	Низкая	Средняя	Повышенная	Высокая	Весьма высокая
Рейтинговое значение	**5**	**25**	**50**	**75**	**100**

Таблица 5.5 – Коррозионная активность грунтов по отношению к углеродистой стали в зависимости от величины потери массы образца

	Потеря массы образца, г				
	До 1	От 1 до 2	ОТ 2 до 3	От 3 до 4	Свыше 4
Показатель коррозионной активности	Низкая	Средняя	Повышенная	Высокая	Весьма высокая
Рейтинговое значение	5	25	50	75	100

5.2 Напорные водоотводящие трубопроводы

Ниже представлена рекомендуемая последовательность ранжирования дестабилизирующих надежность труб факторов:

- материал труб (4–100 баллов),
- год укладки (3–100 баллов),
- наличие и качество изоляционного покрытия (3–100 баллов),
- диаметр трубопровода (1–100 баллов).
- наличие и глубина залегания подземных вод (7–100 баллов),
- интенсивность транспортных потоков (5–100 баллов),
- грунтовые условия (5–100 баллов),
- глубина залегания (4–100 баллов),
- отсутствие защиты от электрокоррозии (2–100 баллов),
- число ранее произошедших аварий (повреждений, 2–100 баллов),
- гидравлические показатели (2–100 баллов),

Количественная оценка элементов состояния каждого фактора представлена в паспорте ранжирования для напорных водоотводящих трубопроводов, (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Паспорт ранжирования по балльной системе

Внешние факторы и элементы их состояния	Баллы значимости
Наличие и глубина залегания подземных вод	
- при напоре воды свыше 4 м и наличии минерализованных вод	100
- то же при наличии слабоминерализованных вод	75
- то же при наличии пресных вод	50
- при напоре воды от 3 до 4 м и наличии минерализованных вод	95
- то же при наличии слабоминерализованных вод	70

- то же при наличии пресных вод	45
- при напоре воды от 2 до 3 м и наличии минерализованных вод	90
- то же при наличии слабоминерализованных вод	65
- то же при наличии пресных вод	40
- при напоре воды от 1 до 2 м и наличии минерализованных вод	85
- то же при наличии слабоминерализованных вод	60
- то же при наличии пресных вод	35
- при напоре воды менее 1 м и наличии минерализованных вод	80
- то же при наличии слабоминерализованных вод	55
- то же при наличии пресных вод	30
Отсутствие подземных вод	7
Отсутствие сведений о подземных водах	54
Интенсивность транспортных и пассажиропотоков	
Высокая:	
- с расположением участка до кромки дорожного полотна до 20 м	100
- то же от 20 до 50 м	80
- то же от 50 до 20 м	60
Средняя:	
- с расположением участка до кромки дорожного полотна до 10 м	50
- то же от 10 до 20 м	40
- то же от 20 до 50 м	30

Низкая:	
- на проезжей части	10
- на газоне	5
Грунтовые условия (оценка по 4 уровням – *а, б, в* и *г* с выбором максимального значения из них)	
а) преобладающий тип грунта:	
- суглинок	5
- сухой песок	20
- сухой пылевидный грунт	35
- сухой пылевидный грунт с глинистыми включениями	50
- влажный песок	65
- влажный пылевидный грунт	80
- влажный пылевидный грунт с глинистыми включениями	90
- глина	100
Глубина залегания	
менее 2 м	100
от 2 до 4 м	52
более 4 м	4
Материал труб	Усредненные баллы независимо от материала труб
Укладка до 1946	10
с 1946 по 1955	25
с 1956 по 1965	4
с 1966 по 1975	100
с 1976 по 1985	75

С 1986 по 2000 и далее	50
Срок эксплуатации, годы	
0 - 2	3
2,5 - 4	5
5 - 9	10
10 - 14	20
15 – 19	30
20 – 24	40
25 – 29	50
30 – 34	60
35 – 39	70
40 – 44	80
45 - 49	90
50 лет и более	100
Наличие и качество изоляционного покрытия	
Наличие внешнего покрытия	
1. удовлетворительное состояние внешнего покрытия	55
2. неудовлетворительное состояние внешнего покрытия;	100
Наличие внутреннего покрытия	
3. удовлетворительное состояние внутреннего покрытия	55
4. неудовлетворительное состояние внутреннего покрытия	100
При одновременном наличии внешнего и внутреннего покрытий:	
если (1) и (3)	3
если (1) и (4)	55

если (2) и (3)	55
если (2) и (4)	100
Отсутствие защиты от электрокоррозии	
- отсутствие СКЗ	100
- наличие СКЗ и неэффективная ее работа	51
- наличие СКЗ и эффективная ее работа	2
Число уже прошедших аварий (повреждений) на участке	
для стальных труб:	
- при отсутствии повреждений	2
- при разрыве стального шва	60
- при обнаружении свищей	100
- при износе лотковой части	40
для чугунных труб:	
- при отсутствии повреждений	2
- при расчеканке раструба	100
- при физическом износе	40
для железобетонных труб:	
- при отсутствии повреждений	2
- при расчеканке раструба	100
- при частичном разрушении трубы	30
Гидравлические показатели	
- при давлении до 10 м вод. ст.	2
- при давлении от 10 до 20 м в. ст.	40
- при давлении от 21 до 30 м в. ст.	60
- при давлении более 30 м в. ст.	100
Диаметр трубопровода	
До 250 мм	100

от 300 до 600 мм	50
от 700 до 900	30
1000 мм и более	1

Рейтинговая значимость участка определяется суммой баллов, получаемой от сложения значений правого столбца. Потенциально опасным считается участок трубопровода с максимальным рейтинговым значением, т.е. максимальным числом баллов значимости.

5.3 Безнапорные водоотводящие трубопроводы

Безнапорная водоотводящая сеть эксплуатируется при воздействии на нее множества внешних неблагоприятных факторов, подавляющее большинство которых носит случайный и практически неконтролируемый характер.

К основным факторам, дестабилизирующим надежность и экологическую безопасность трубопроводов безнапорных водоотводящих сетей, отнесены: физический износ, возраст трубопроводов, гидравлические параметры течения сточных вод, наличие подземных вод, агрессивных грунтов, прорастание корневых систем деревьев и кустарников внутрь трубопровода (по причине образования многочисленных открытых трещин), дефекты стыковых соединений, нарушение уклона в профиле, смещение в плане и т. д., а также качество материала труб. Количественная оценка элементов состояния каждого фактора представлена в паспорте ранжирования для безнапорных водоотводящих трубопроводов (таблица 5.7).

Таблица 5.7 – Паспорт ранжирования участков безнапорных водоотводящих трубопроводов по балльной системе

Внешние факторы и элементы их состояния	**Баллы (коэффициенты) значимости**
Наличие (отсутствие) подземных вод	
-при напоре воды свыше 4 м	3300
-при напоре воды от 3 до 4 м	3184
-при напоре воды от 2 до 3 м	3063
-при напоре воды от 1 до 2 м	2942
-при напоре воды менее 1 м	2782
Отсутствие подземных вод	2601
Глубина залегания труб (в диапазоне)	
более 4,0 м	2600
4,0 – 3,5 м	2400
3,5 – 3,0 м	2250
3,0 – 2,5 м	2140
2,5 – 2,0 м	2060
2,0 – 1,5 м и менее	2001
Состояние грунтов вокруг трубопровода	
- сухой песок	1801
- суглинок	1850
- влажный песок	1900
- глина	2000
Год укладки	
С 1890 по 1910	1601
С 1911 по 1940	1640
С 1941 по 1950	1601
С 1951 по 1955	1700

С 1956 по 1964	1800
С 1965 по 1970	1700
С 1971 по 1980	1650
С 1981 по настоящее время	1601
Диаметр	
100 - 125 мм	1401
140 - 150 мм	1450
180 - 200 мм	1500
230 - 250 мм	1550
280 - 300 мм	1600
Интенсивность транспортных потоков	
Высокая:	1301
Средняя:	1350
Низкая:	1400
Наличие и характер выявленных повреждений и дефектов (по результатам диагностики и эксплуатационным данным)	
Нарушение герметичности: - множественные или единичные закрытые трещины	1300
- множественные или единичные открытые (сквозные поперечные, продольные, круговые, винтообразные) трещины	
- без эксфильтрации	1080
- без инфильтрации	1040
- с инфильтрацией	1020
- с эксфильтрацией	1001
Деформация тела трубы и изменение в плане и профиле	

- разрушение трубы или просадка днища, свода, стенок	1000
- местная деформация	920
- повреждения горловины труб в колодцах	875
- изменение в профиле:	855
- с образованием обратного уклона	840
- с увеличением уклона	815
- перелом	801
Дефекты внутренней поверхности	
- абразивный износ (частичный)	800
- разрушение защитной оболочки	724
- коррозия (частичная)	706
- оголение арматуры	701
Препятствия течению жидкости	
- прорастание корней деревьев или кустарников	700
- наличие уплотненного несмываемого осадка песка, жировых или солевых наносов	440
- закупорка живого сечения трубы инородными предметами или примыкающими трубопроводами	301
Нарушения в стыках	
- дефект заделки стыка (чеканки) кольцевого пространства раструба	300
- продольное смещение или сдвиг труб –	225
- разрушение торцов труб в пределах стыков	150
- нарушение стыковки по горизонтали и	80

(или) по вертикали	
- дефект опорного кольца	1
Материал и диаметр участка трубопровода*	Принимается согласно таблице 5.8
ОБЩАЯ СУММА БАЛЛОВ	

Таблица 5.8 – Балльные значения элементов состояния в зависимости от материала и диаметра труб при оценке работы трубопроводной системы через степень засоряемости

Материал и диаметр, мм	**Рейтинговое значение, балл**
Керамические трубы	
125	700
150	550
200	390
250	330
300	301
Асбестоцементные трубы	
141	700
189	360
200	340
235	315
279	305
291	303
300	301
Чугунные трубы	
150	700
189	435
200	380
235	340

250	320
300	301
Полиэтиленовые трубы	
141	700
150	540
160	450
189	350
200	340
225	320
250	305

Рейтинговая значимость участка определяется суммой баллов, получаемой от сложения значений правого столбца таблицы 5.7 Потенциально опасным считается участок трубопровода с максимальным рейтинговым значением, т. е. максимальным числом баллов (коэффициентов) значимости.

6 МЕТОДИКА ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ И ПЕРЕКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Методика основана на формировании и использовании результатов:

- оценки и прогноза показателей надежности трубопроводов по результатам статистической обработки эксплуатационных данных по отказам трубопроводов;

- анализа технического состояния участков трубопроводов (техническая диагностика);

- паспортизации участков трубопроводов;

- балльного (рейтингового) ранжирования участков трубопроводов по комплексному воздействию дестабилизирующих надежность труб факторов и условий эксплуатации;

- расчета остаточного ресурса (для стальных трубопроводов).

Алгоритм методики выбора объектов восстановления трубопроводов основан на многофакторном анализе и оценке надежности и технического состояния трубопроводов – пошаговом процессе выбора для восстановления из большого числа **потенциальных** участков трубопроводов некоторого ограниченного количества **приоритетных** и включает:

Этап 1. Выбор **потенциальных** объектов восстановления трубопроводов на основе выделения и количественной оценки базового (основного) фактора, которым служит уровень надежности трубопроводов, определяемый числом и интенсивностью отказов (аварий) трубопроводов за выбранный промежуток времени.

Этап 2. Выбор **приоритетных** объектов восстановления из числа потенциальных на основе ранжирования дестабилизирующих и косвенных факторов, влияющих на надежность участков трубопроводов, их остаточный ресурс и технико-экономические показатели в реальных условиях эксплуатации.

Оценка реального воздействия на трубопровод дестабилизирующих его надежность факторов и условий эксплуатации принимается на основании анализа результатов технической диагностики труб и причин образования дефектов труб, значительного опыта эксплуатации и оценена с учетом взаимного влияния и сочетаемости нагрузок и воздействий различного происхождения (раздел 5).

Алгоритм реализован в виде компьютерной программы «Оценка надежности и планирование восстановления водопроводных и водоотводящих трубопроводов».

Программа позволяет в автоматизированном режиме формировать и списки объектов перекладок и реновации трубопроводов водоснабжения и водоотведения (потенциальных и приоритетных) и оценить различные варианты стратегии восстановления трубопроводов и принимать обоснованное решение о:

- целесообразности дальнейшей эксплуатации участков трубопроводов;
- технических мероприятиях по восстановлению несущей способности трубопроводов;
- сроках повторной диагностики трубопроводов;
- выборе объектов перекладки и восстановления трубопроводов и соответственно определить объемы (планы) ежегодного восстановления трубопроводов.

6.1 Методика выбора объектов восстановления водопроводных трубопроводов

Для автоматизированного выбора объектов восстановления водопроводных трубопроводов используется программный модуль «Планирование восстановления водопроводных трубопроводов», рисунок 6.1.

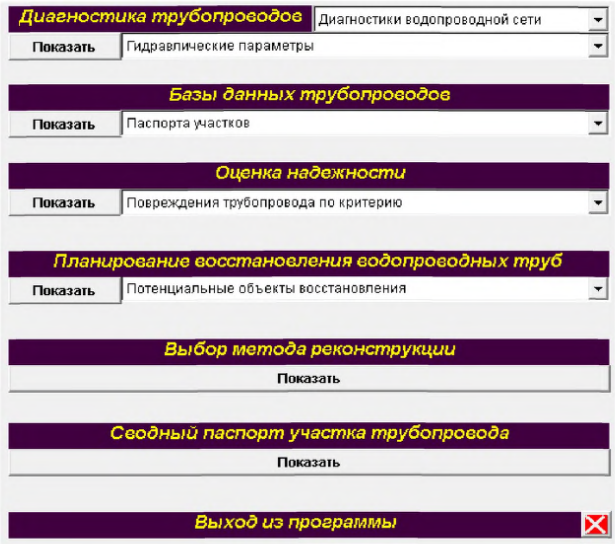


Рисунок 6.1 – Программный модуль «Планирование восстановления водопроводных трубопроводов»

Определение потенциальных объектов восстановления водопроводных трубопроводов осуществляется на основе выделения и количественной оценки базового (основного) фактора, которым служит уровень надежности трубопроводов и сравнение его с пороговым значением.

Понятие «пороговое значение» (или диапазон значений) интенсивности отказов участков трубопроводов городской водопроводной сети (в распределении по материалам, диаметрам и назначению сети) используется в данной методике в том смысле, что участки трубопроводов, у которых интенсивность отказов превышает установленное пороговое значение, являются потенциальными кандидатами на восстановление.

Для определения потенциальных объектов восстановления водопроводных трубопроводов «Методикой» рекомендуются следующие пороговые значения интенсивности отказов, таблица 6.1.

Таблица 6.1 – Пороговые значения интенсивности отказов водопроводных трубопроводов

Стальные трубы (диаметр)			Чугунные трубы (диаметр)		
до 200 мм	250-600 мм	Свыше 600 мм	до 200 мм	250-600 мм	Свыше 600 мм
1,2	0,63	0,11	0,82	0,41	0,1

Приоритетные объекты восстановления трубопроводов определяются в результате оценки и анализа 12 факторов и обстоятельств, влияющих на надежность участков трубопроводов, и определения коэффициентов значимости участков – баллов (рисунок 6.2).

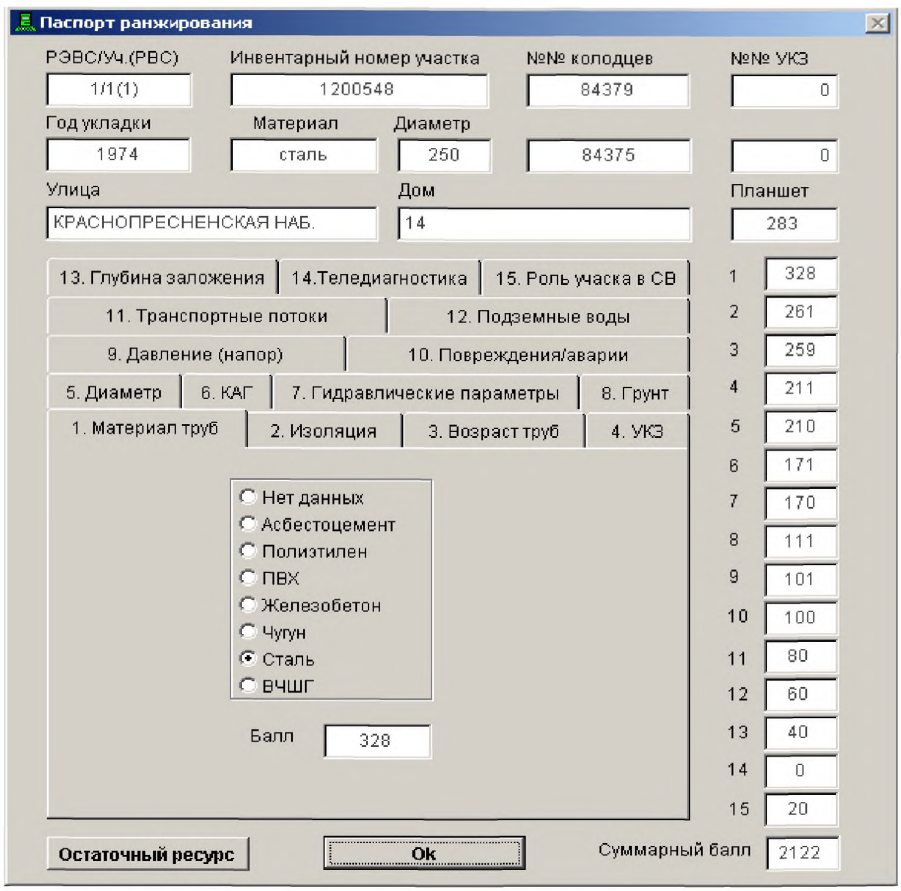


Рисунок 6.2 – Паспорт ранжирования участка водопроводного трубопровода

Первоочередными «кандидатами» на включение в ежегодную программу работ по восстановлению трубопроводов водопроводной сети являются наиболее дефектные трубопроводы с наибольшими значениями коэффициентов значимости (баллов).

6.2 Методика выбора объектов восстановления напорных водоотводящих трубопроводов (НТ)

Методика включает следующие этапы.

Этап 1. Определение **потенциальных** объектов восстановления участков НТ на основе выделения и количественной оценки базового (основного) фактора, которым служит уровень надежности трубопроводов, определяемый числом и интенсивностью аварий труб.

Этап 2. Определение **приоритетных** объектов восстановления на основе ранжирования ряда дестабилизирующих надежность труб факторов и условий эксплуатации, влияющих на надежность участков трубопроводов в реальных условиях эксплуатации.

Методика реализована компьютерной программой «Оценка надежности и планирование восстановления водопроводных и водоотводящих трубопроводов». На рисунке 6.3 приведен программный модуль «Планирование восстановления водоотводящих трубопроводов».

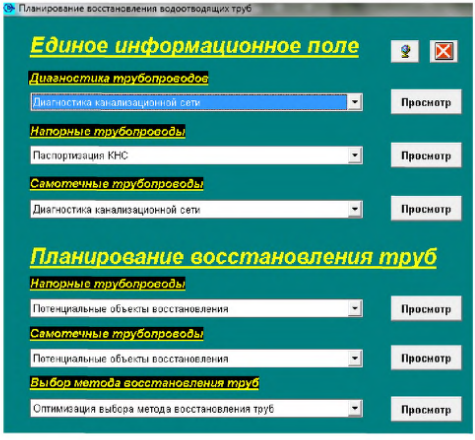


Рисунок 6.3 – Модуль «Планирование восстановления водоотводящих трубопроводов»

Для реализации методики планирования восстановления напорных водоотводящих трубопроводов необходима информационно-техническая база по эксплуатации напорной канализации города, которая должна включать в электронном виде:

- данные по инвентаризации и паспортизации НТ,
- статистический эксплуатационный материал по авариям и повреждениям напорных водоотводящих
- данные по технической диагностике НТ.

Аналогично водопроводным трубопроводам **потенциальные** объекты восстановления напорных водоотводящих трубопроводов определяются при активации режима «Потенциальные объекты восстановления», после которого формируется список участков трубопроводов с указанием количества аварий.

Выбор **приоритетных** объектов восстановления из числа потенциальных осуществляется путем заполнения для них паспортов ранжирования (рисунок 6.4).

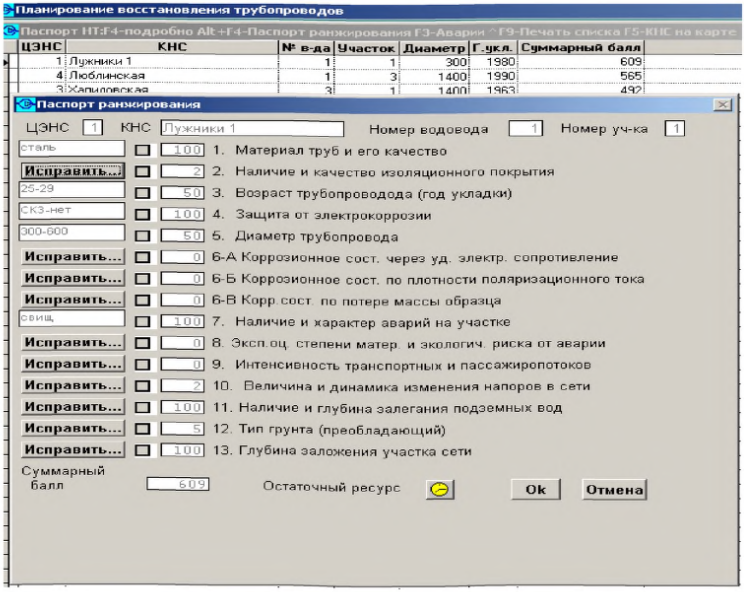


Рисунок 6.4 – Паспорт ранжирования напорных водоотводящих трубопроводов

Приоритетными из числа потенциальных объектов восстановления НТ считаются участки трубопроводов с максимальным рейтинговым значением, т.е. максимальным числом баллов значимости. Для этих объектов проводится прогноз технического состояния трубопровода с использованием расчета остаточного ресурса участка трубопровода по методике, приведенной в [9].

Под остаточным ресурсом (или остаточным сроком службы) понимается наработка трубопровода от момента его диагностирования до достижения предельного состояния.

Для определения остаточного ресурса необходимо знать:

- определяющие техническое состояние объекта параметры, изменение которых может привести к предельному состоянию (например, остаточная толщина стенки трубопровода);

- величину параметров на момент диагностирования;

- скорость изменения этих параметров в течение последующей диагностирования эксплуатации;

- значение величины параметра, достижение которого соответствует предельному состоянию объекта (т. е. критерии предельного состояния, например, минимально допустимая толщина стенки трубопровода).

Оценка остаточного ресурса трубопровода заключается в сопоставлении величин:

- расчетной требуемой толщины стенки трубопровода $d_{\text{расч. тр}}$;

- проектной толщины стенки $d_{\text{проек}}$, т.е. согласно ГОСТ на соответствующий диаметр трубы и марку стали;

- остаточной толщины стенки $d_{\text{ост}}$ (как результата проявления коррозионных процессов на внутренней и внешней поверхности трубопровода во времени).

Расчетная толщина стенки принимается на основании прочностного расчета с использованием данных по диаметрам трубопроводов и окружающей обстановке. Целью прочностного расчета является определение остаточной толщины стенки $d_{\text{ост.}}^{*}$, ниже которой наблюдаются или

необратимые процессы разрушения трубопровода или превышающие предельно-допустимые значения деформации стенки.

Введение единой балльной системы оценки по дестабилизирующим работу НТ факторам позволяет классифицировать трубопроводы по категории надежности (например, высокая, средняя и низкая степень) и принять решение (план действий) по дальнейшей эксплуатации трубопровода, например, по следующей схеме:

- относительно низкая степень надежности участка напорного канализационного трубопровода (1100–600 баллов) – рекомендации по перекладке и замене материала труб;

- средняя степень надежности участка НТ (590–100 баллов) – рекомендации по замедлению процессов коррозии и старения (определяются для каждого участка на основании экспертной оценки специалистов, например, путем установки установок катодной защиты, реконструкции с использованием цементно-песчаных или полимерных покрытий, реновация методом протягивания новой трубы в старую без ее разрушения или с предварительным разрушением);

- относительно высокая степень надежности участка НТ (менее 100 баллов) - рекомендации дальнейшей эксплуатации канализационных труб с повторной диагностикой (теледиагностикой) через 2 года (99–50) или через 5 лет (менее 50 баллов).

6.3 Методика выбора объектов восстановления самотечных водоотводящих трубопроводов

Методика включает два этапа.

Этап 1. Выбор потенциальных объектов восстановления самотечных водоотводящих трубопроводов на основании:

1) оценки технического состояния самотечных водоотводящих трубопроводов, определяемого результатами анализа технико-экономических

и паспортных данных трубопроводов, осмотра внутренней поверхности трубопроводов с помощью средств телевизионной диагностики;

2) оценки числа и интенсивности засоров водоотводящих трубопроводов в распределении по материалам, диаметрам труб и срокам их эксплуатации;

3) анализа возможного риска нанесения материального и экологического ущерба населению и окружающей среде от повреждений и аварий на трубопроводах.

Для реализации выбора потенциальных объектов восстановления трубопроводов используется модуль «Планирование восстановления водоотводящих трубопроводов», включающий базу данных по паспортизации и эксплуатации безнапорных водоотводящих трубопроводов и результаты технической диагностики трубопроводов.

Этап 2. Выбор приоритетных объектов восстановления.

Основными критериями, влияющими на выбор приоритетных из числа потенциальных объектов восстановления трубопроводов является оценка и ранжирование следующих основных дестабилизирующих надежность труб факторов и признаков:

- материал и диаметр труб;
- вид сети (дворовая, городская);
- гидравлические параметры работы трубопроводов;
- смещение труб с разрушением раструбов или соединительных муфт;
- расхождение труб в местах стыковых соединений;
- продольные или поперечные трещины;
- прорастание раструбов корнями деревьев;
- истирание лотковой части труб;
- разрушение труб;
- степень воздействия газовой коррозии на железобетонные трубопроводы и сооружения;
- просадка труб и колодцев;

- поступление грунтовых вод через не герметичные стыковые соединения или через стенки труб и т. д.;

- количество и частота повреждений, аварий труб и случайных засорений;

- грунтовые и гидрогеологические условия.

Эти факторы определены и ранжированы по значимости (весовые коэффициенты – баллы) их влияния на риск аварий (раздел 5).

Из числа потенциальных выбираются приоритетные объекты восстановления, исходя из «Паспорта ранжирования» **(рисунок 6.5).**

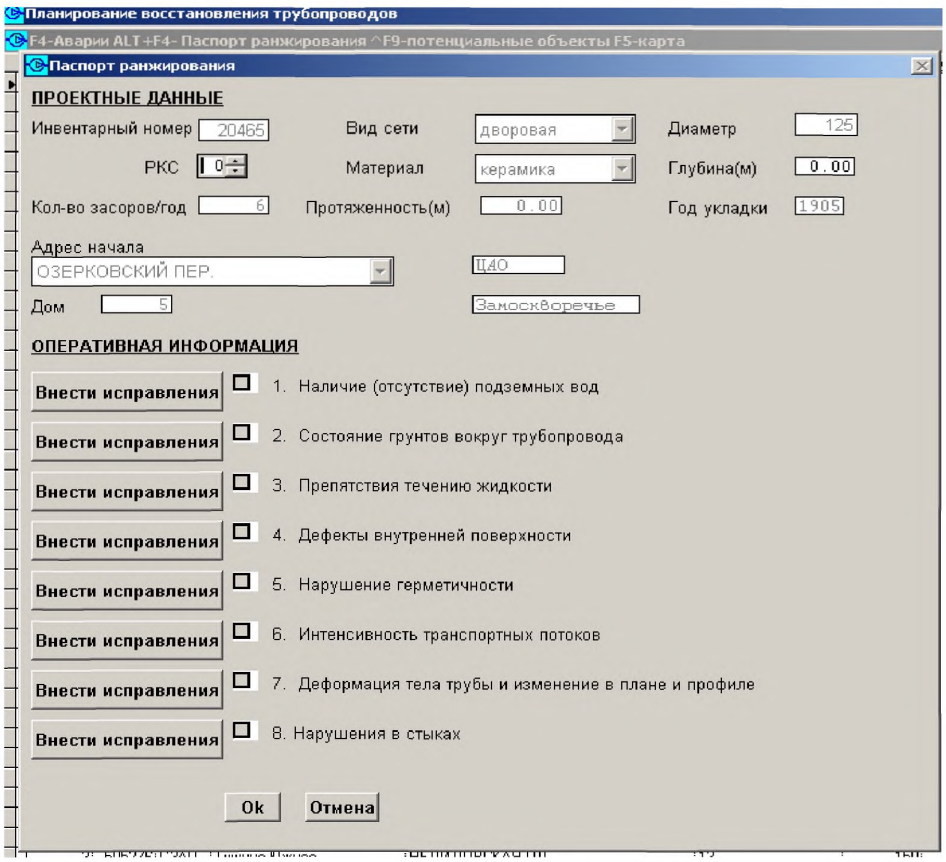


Рисунок 6.5 – Паспорт ранжирования участка самотечного водоотводящего трубопровода

Приоритетными среди выбранных на первом этапе потенциальных для проведения работ по восстановлению трубопроводов будут считаться

участки сети, где суммы коэффициентов значимости составляют максимальные величины.

Работа программы – «Оценка надежности и планирование восстановления водопроводных и водоотводящих трубопроводов» является советчиком специалистов предприятия ВКХ (оператора) при решении ими задачи стратегического планирования восстановления и обновления трубопроводов водоотводящей сети.

7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЗАТРАТ И ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ И ПЕРЕКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Эффективность реализации «Методики планирования восстановления водопроводных и водоотводящих трубопроводов» включает:

- технико-экономическую эффективность,

- общественную (социально-экономическую) эффективность.

Показателем экономического эффекта от реализации «Методики» является показатель ежегодного, по сравнению с текущим уровнем, снижения затрат на ликвидацию аварий за счет сокращения их количества на 1 км трубопровода, снижение затрат от потери водного ресурса, экономии электроэнергии.

Другими положительными эффектами от реализации «Методики» являются:

1) повышение надежности водоснабжения;

2) повышение качества подаваемой воды;

3) снижение количества аварийных изливов воды;

4) снижение затрат капитального характера за счет уменьшения количества ремонтно-восстановительных работ;

5) снижение эксплуатационных затрат;

6) улучшение имиджа и деловой репутации предприятия ВКХ.

Ниже приведена методика расчета экономического эффекта от поэтапной реализации «Методики планирования восстановления водопроводных и водоотводящих трубопроводов».

Наличие численных оценок показателей надежности трубопроводов позволяет оценить суммарный ущерб при их отказах. В развернутом виде годовой суммарный ущерб от аварий и повреждений труб вычисляется по формуле:

$$Y_{\Sigma} = n_o \cdot З_в \cdot + Y_п + Y_э, \quad (7.1)$$

где n_o – число отказов в год трубопроводов, сопровождающихся изливом воды в окружающую среду,

$З_в$ – затраты на ремонтно-восстановительные работы по ликвидации одного отказа (аварии с изливом воды),

$Y_э$ – экологический ущерб, обусловленный восполнимыми и невосполнимыми потерями окружающей среде при отказе трубопровода и изливе воды.

Экономия от сокращения затрат на ликвидацию аварий и повреждений трубопроводов при реализации «Методики» на предприятии ВКХ рассчитывается по формуле:

$$Э_{ав} = (n_{до} - n_{после}) \cdot C_{ав},$$

где $Э_{ав}$ – экономия от сокращения затрат на ликвидацию аварий и повреждений трубопроводов, тыс. руб.;

$n_{до}$ – число отказов в год (аварий и повреждений) трубопроводов, сопровождающихся изливом воды в окружающую среду до реализации «Методики»,

$n_{после}$ – число отказов в год (аварий и повреждений) трубопроводов, сопровождающихся изливом воды в окружающую среду после реализации «Методики»,

$C_{ав}$ – стоимость ликвидации аварии, тыс. руб.

Экономия от сокращения затрат на возмещение экологического ущерба:

$$\Delta Y_э = 365 (Q_1 \cdot y_1 - Q_2 \cdot y_2),$$

где Q_1 – суммарная величина потерь воды при авариях трубопроводов и скрытых утечках до реализации «Методики», м^3/сут.;

Q_2 – суммарная величина потерь воды при авариях трубопроводов и скрытых утечках после реализации «Методики», м^3/сут.;

y_1 и y_2 – экспертная оценка удельного экологического ущерба $Y_э$ при поступлении 1 м^3 воды в грунт до реализации «Методики» и после.

Экономия от снижения потерь водного ресурса представляет собой разницу между потерями воды до реализации «Методики» и после ее реализации:

$$\Delta Y_n = \Delta Y_э = 365 \cdot (Q_1 \cdot y_1 - Q_2 \cdot y_2),$$

где Q_1 – суммарная величина потерь воды при авариях трубопроводов и скрытых утечках до реализации «Методики»,

Q_2 – суммарная величина потерь воды при авариях трубопроводов и скрытых утечках после реализации «Методики»,

y_1 и y_2 – экспертная оценка стоимости 1 м^3 воды до реализации «Методики» и после.

Экономия электроэнергии за счет уменьшения гидравлического сопротивления после реконструкции трубопровода и, следовательно, подсчитывается по формуле:

$$\Delta Э = \frac{\gamma Q \Delta H}{102 \eta_{агр}} T,$$

где ΔH – снижение потерь напора по длине трубопровода, м вод. ст.

Потери напора по длине трубопровода рассчитываются по формуле:

$$H = i \cdot L = \lambda \cdot (1/d_p) \cdot (V^2/2g) \cdot L,$$

где i – гидравлический уклон, м вод. ст.;

λ – коэффициент гидравлического трения;

dp – расчетный внутренний диаметр трубы, м;

v – средняя скорость движения воды, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/ кв. с;

L – протяженность трубопровода, м.

Снижение потерь напора по длине трубопровода за счет нанесения защитного покрытия (например, цементно-песчаного) определяется из выражения:

$$\Delta H = H_1 - H_2 = \lambda_1 \cdot (1/d_{p1}) \cdot (V_1^2/2g) \cdot L - \lambda_2 \cdot (1/d_{p2}) \cdot (V_2^2/2g) \cdot L,$$

где H_1 – потери напора в невосстановленном трубопроводе, м вод. ст.;

H_2 – потери напора в восстановленном (реконструированном) трубопроводе, м вод. ст;

λ_1, λ_2 – коэффициенты гидравлического трения, соответственно, исходного и реконструированного трубопроводов.

Расчет величины годовой экономия электроэнергии ΔЭ (кВт·ч) на единицу длины трубопровода при его реконструкции бестраншейными методами представлен в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Сводные расчетные данные по годовой экономии электроэнергии $\Delta Э_{1м}$ в при реконструкции трубопровода с использованием ЦПП

Метод реновации	Внутренний диаметр старого трубопровода, м	Значения ΔЭ, кВт·ч
Протаскивание полимерной трубы	1,0	68,7426
	0,8	49,3853
	0,6	38,4467
	0,4	20,6902
	0,2	2,9214
Нанесение цементно-песчаного покрытия	1,0	60,3373
	0,8	50,3047
	0,6	42,1841
	0,4	27,5611
	0,2	13,8871

$\Delta Э_{ср}$ = 38,85 кВт·ч.

С учетом этих данных при прогнозном значении тарифа на электроэнергию экономия от сокращения затрат на электроэнергию при реализации «Методики» при реконструкции ветхих трубопроводов определяется по формуле: $Э = \Delta Э \cdot L \cdot T$,

где L – протяженность восстановленных трубопроводов;

Э – экономия от сокращения затрат на электроэнергию;

$\Delta Э$ – величина снижения расхода электроэнергии на транспортировку воды, тыс. кВт *ч/год при условии реконструкции ветхих труб, км.

T – тариф на электроэнергию.

Список использованных источников

1. Примин О.Г. Разработка и применение информационных технологий для оценки и обеспечения экологической безопасности и надежности сетей водоснабжения и водоотведения города. Дисс. д-р техн. наук, М., 2001

2. Терминология по надежности больших систем энергетики. Изд.АН СССР. Энергетика и транспорт, 1976

3. Храменков С.В., Примин О.Г. Орлов В.А. Реконструкция трубопроводных систем. М., Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008

4. Герцбах И.Б. Модели отказов, М., Стройиздат, 1986

5. Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике, М., Наука, 1985

7. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Специфика показателей надежности водоотводящих сетей. Журнал Водоснабжение и санитарная техника. № 5, 2012

8. Правила холодного водоснабжения и водоотведения. Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 № 644

9. Методика оценки остаточного ресурса технологических трубопроводов. АООТ «ВНИКТИнефтехимоборудование», М., 2006

10. Caruso H. “To Much Time in Bathtub (Curve) – An Aging Aircraft Paradigm that Doesn’t Hold Water”, Joint Council an Aging Aircraft, Aging Aircraft Conference Technical Paper, 2015

11. Bowles J. B. Commentary – Caution: Constant Failure-Rate Models May be Hazardous to Your Design, “IEEE Transactions on Reliability”, 51, 2012

12.Jaisingh L. R., Kolarik W. J., Dey D. K. A Flexible Bathtub Hazard Model for Non-Repairable Systems with Uncensored Data, “Microelectronics Reliability”, 27, 2014

13. Xie M., Lai C. C. Reliability Analysis Using an Additive Weibull Model with Bathtub-Shaped Failure Rate Function, “Reliability Engineering and System Safety”, 52, 2015

gost.e-ecolog.ru