

## **РАСЧЕТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ПРОТЯЖЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ**

**Крыгин А. А.<sup>1</sup>**

*(ФГБУН Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

*Статья является продолжением исследования вопросов оптимизации ремонтных работ на участках инженерных сетей и посвящена применению полученных результатов для практической оценки состояния участков и информационной поддержке при принятии решения о продлении его срока службы. Для этого было выделено три задачи: определение оптимального срока замены участка, определение комплексного технико-экономического показателя состояния участка и выбор наилучшего метода его диагностики, которые были решены на примере сети теплоснабжения. В ходе исследования возникла необходимость более детально раскрыть некоторые вопросы оптимизации ремонтов участков инженерных сетей, касающиеся анализа жизненного цикла участка и моделирования потока повреждений для определения функции зависимости суммарных затрат на обслуживание участка от времени. Было показано, что поток повреждений на участке теплопровода достаточно точно описывается с помощью распределения Вейбулла, и предложены методики построения функций зависимости общего числа повреждений и суммарных затрат на обслуживание участка от времени, использующие статистические данные по повреждениям на участке. С помощью этой функции были построены критерии, по которым определяется наилучший метод диагностики, комплексный показатель и оптимальный срок замены участка как момент времени, при котором удельные затраты на его обслуживание достигают своего минимума.*

Ключевые слова: оптимизация ремонтов участков тепловых сетей, определение комплексного показателя состояния участка, оптимизация диагностики тепловых сетей.

### **1. Введение**

Задачи планирования ремонтных работ на городских инженерных сетях и разработка методов их решения являются одними из важнейших в комплексе вопросов управления городскими инженерными системами. Успешное решение этих задач в условиях крупного развивающегося мегаполиса

---

<sup>1</sup> Андрей Александрович Крыгин, к.т.н., н.с. ([andreyakr@yandex.ru](mailto:andreyakr@yandex.ru)).

невозможно без системы информационной поддержки принятия решений (СИППр), предоставляющей необходимые для эксперта данные на каждом этапе планирования ремонтных работ. Одна из главных проблем построения СИППр в рассматриваемой области заключается в ряде особенностей инженерных сетей, не позволяющих использовать современные методики и программные продукты без их серьезной адаптации под предметную область. В данной работе исследовались вопросы планирования ремонтных и диагностических работ для протяженных участков сети теплоснабжения. В процессе анализа этапов планирования было выявлено три задачи, решение которых необходимо для построения СИППр:

- оценка оптимального времени плановой замены участка сети;
- оценка комплексного показателя состояния участка сети;
- определение оптимального метода диагностики участка сети.

Очевидно, что при решении этих задач необходимо проводить оценку технического состояния участка и параметров надежности. Этой теме посвящено большое количество работ, которые можно разделить на две группы: работы, рассматривающие методы оценки параметров надежности обобщенного «изделия», и работы, рассматривающие те же задачи применительно к конкретным видам объектов в некоторой отрасли. Так как в данной работе исследуются протяженные участки сетей теплоснабжения, то из второй группы выбирались работы, посвященные оценке надежности трубопроводов.

В работах первой группы [1-4, 14, 15] приводятся наиболее распространенные математические модели отказов, соответствующие им законы распределения времени безотказной работы и методы оценки параметров этих распределений по имеющейся статистике. В работе [7] проводится подробная классификация отказов и методики оценки стандартных комплексных показателей: коэффициента готовности и технического использования для трубопроводов. В [12] указываются наиболее распространенные законы распределения времени безотказной работы трубопроводов и методы определения параметров этих законов.

Для нахождения оптимального времени плановой замены участка теплосети (и других поставленных в этой работе задач) недостаточно рассмотренных методов. Обоснуем это утверждение.

В соответствии с нормативным документом [11], предельным состоянием трубопроводов является уменьшение толщины его стенок до предельной (расчетной) величины, ниже которой не обеспечивается необходимый запас его несущей способности. Применительно к сетям теплоснабжения это определение сложно связать с оптимальным временем замены участка по двум причинам.

1. С некоторыми оговорками здесь имеется в виду средняя толщина стенок трубопровода. В теплоснабжении часто встречается ситуация, когда средняя толщина стенки трубопровода может быть ниже предельной, но состояние участка не является предельным, так как более целесообразным решением будет проведение локально-вставочного ремонта (ЛВР), заменив наиболее коррозийные участки, а не полную замену.

2. Подходы, использующие методики измерения толщины трубопровода, хорошо работают в случаях, когда риск от последствий повреждения значительно превышает стоимость ремонтных работ на восстановление трубопровода или его замену. В теплоснабжении это не совсем так. Проводить для измерения толщины стенки дорогостоящую внутритрубную диагностику не является целесообразным в случаях, когда участок находится в хорошем состоянии или когда выгодней проводить его диагностику другими, менее точными методами, стоимость которых на несколько порядков ниже.

Для участков сетей теплоснабжения определение предельного состояния из [11] не всегда согласуется с ГОСТ 27.002-89 [5]. Поэтому при решении поставленных задач необходимо также проводить экономическую оценку, сопоставляя убытки при возникновении повреждения, расходы на диагностику, обслуживание и замену участка, при реализации различных управленческих решений.

Централизованная система теплоснабжения широко применяется в Скандинавии и Прибалтике. К сожалению, зарубежные публикации по данной теме отсутствуют. Анализ отечественных

методик для участка теплосети показал, что, во-первых, в них всегда используются эмпирические методы, применение которых не всегда оправдано [6], а во-вторых, не учитываются экономические факторы. В [9] для оценки интенсивности отказов рекомендуется использовать распределение Вейбулла

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^c}$$
 со строго заданной эмпирической зависимостью от времени значения коэффициента  $c$ , без учета статистики повреждений, влияния коррозионных факторов, условий эксплуатации и пр. на конкретный участок.

В [10] предложены аналогичные рекомендации при оценке интенсивности отказов, если нет полных статистических данных о повреждениях на участке. Если они есть, то «используются характеристики надежности, полученные на основе обработки статистики», при этом методика обработки не уточняется.

В работе [8] предложена методика определения оптимального времени замены участка инженерной сети. В качестве критерия оптимальности был выбран минимум (по времени проведения планового ремонта  $T$ ) общих удельных затрат  $S_y(T) = S(T)/T$ . Было показано существование и единственность оптимального времени замены  $T_0$ , соответствующего минимуму  $S_y(T)$ . Следовательно, проведение планового ремонта с периодом, отличающимся от  $T_0$ , является нецелесообразным, так как такая стратегия соответствует более высоким затратам на обслуживание участка, а сам момент времени  $T_0$  соответствует предельному (по ГОСТ 27.002-89 [5]) состоянию рассматриваемого объекта.

Однако в этой модели не учитываются в полной мере особенности эксплуатации конкретных инженерных сетей. Поэтому при применении на практике предложенного подхода возникла необходимость провести следующий ряд дополнительных исследований:

1. Анализ этапов жизненного цикла участка.
2. Моделирование потока повреждений с помощью вероятностного распределения.
3. Построение функции  $S(T)$  – суммарных затрат на обслуживание участка за время  $T$ .

4. Определение комплексного технико-экономического показателя состояния участка, оптимального времени его замены и оптимального метода диагностики с помощью полученной функции  $S(T)$ .

## 2. Основные этапы жизненного цикла участка теплопровода

На рис. 1 представлен фрагмент общей схемы процессов жизненного цикла участка теплопровода.

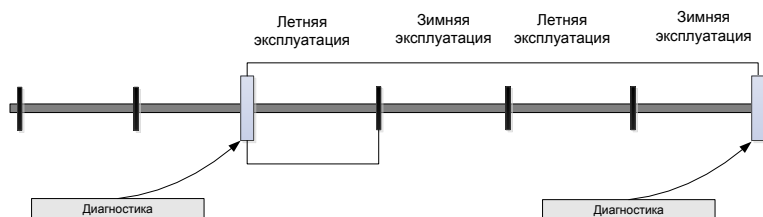


Рис. 1. Этапы жизненного цикла участка теплопровода

Жизненный цикл состоит из трех повторяющихся этапов: диагностики, ремонтных работ и эксплуатации и завершается плановой заменой участка.

### Этап диагностики

Порядок выполнения этой операции следующий: составляется план работ по бесконтактной и контактной и диагностике, выполняются диагностические работы, проводится комплексная оценка полученных данных, составляется план ремонтных мероприятий, определяется остаточный ресурс участка и выдаются рекомендации по его дальнейшему использованию. Также каждый год по правилам эксплуатации теплосетей выполняется опрессовка участка, которую удобно рассматривать как один из методов диагностики. Рекомендации содержат либо перечень ремонтных работ и величину, на которую продлевается срок службы участка, либо, если участок находится в ветхом состоянии, постановку его в перечень участков, подлежащих плановой замене.

Предложенные методики информационной поддержки применяются на стадиях составления плана работ по диагностике и комплексной оценке.

*Этапы летней и зимней эксплуатации*

На этапе летней эксплуатации выполняется составленный ранее план корректирующих мероприятий участка (в случае проведения диагностики) или выполняются ремонты повреждений, выявленных при опрессовке.

На этапе зимней эксплуатации ремонтные работы проводятся только при возникновении повреждения.

При построении функции  $S(T)$  необходимо рассчитать затраты на этапах диагностики, ремонта и эксплуатации участка теплопровода. В таблице 1 приведены виды затрат на каждом этапе.

*Таблица 1. Виды затрат на каждом этапе жизненного цикла*

Этап жизненного цикла	Виды затрат на этапе
Диагностика	Затраты на различные виды контактной и бесконтактной диагностики
Летняя эксплуатация	Затраты на проведение ремонтных работ повреждений, выявленных на этапе диагностики: ремонт разрывов, свищей, проведение локально-вставочного ремонта (ЛВР).
Зимняя эксплуатация	Затраты на проведение ремонтных работ повреждений, которые не были выявлены на этапе диагностики

Таким образом, для построения функции  $S(T)$  необходимо по имеющейся статистике повреждений спрогнозировать зависимость от времени для следующих величин: общее количество повреждений, общее количество ЛВР, общая длина ЛВР, общее количество свищей и разрывов, произошедших в период зимней эксплуатации.

### **3. Моделирование потока повреждений с помощью вероятностного распределения**

#### **3.1. ВЫБОР ФОРМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

Проверим, насколько хорошо вероятность возникновения аварии за время  $t$  на теплопроводах описывается распределением Вейбулла  $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^c}$ .

Переставляя слагаемые и логарифмируя два раза это равенство, получим

$$(1) \quad \ln(-\ln(1 - F(t))) = c \times \ln(t) - c \times \ln(b).$$

Обозначим  $N(t) = -\ln(1 - F(t))$ ; как было показано в [8],  $N(t)$  равно среднему числу повреждений за время  $t$ . Следовательно, на графике, построенном по точкам  $(x, y)$ , где  $x$  соответствует логарифму числа лет, прошедших с момента эксплуатации участка теплопровода, а  $y$  – логарифму общего числа повреждений, можно ожидать прямую линию. В результате аппроксимации определяются коэффициенты  $m$  и  $n$  прямой линии  $y = m \times x + n$ , а соответствующие коэффициенты  $b$  и  $c$  распределения Вейбулла определяются по следующим формулам:

$$(2) \quad b = e^{-\frac{n}{m}},$$

$$c = m.$$

На рис. 2 приведен типичный график зависимости всех повреждений от времени, построенный в логарифмических шкалах. Как видно из рисунка, этот график достаточно хорошо аппроксимируется прямой линией.

#### **3.2. АППРОКСИМАЦИЯ ЧИСЛА ПОВРЕЖДЕНИЙ**

Для выбора алгоритма аппроксимации были рассмотрены графики участков, которые в наибольшей степени отличаются от прямой линии. Было выделено три характерных вида отклонений: в начале, в середине (рис. 3) и в конце графика. Также имелись случаи, когда на участке возникает комбинация нескольких видов отклонений.

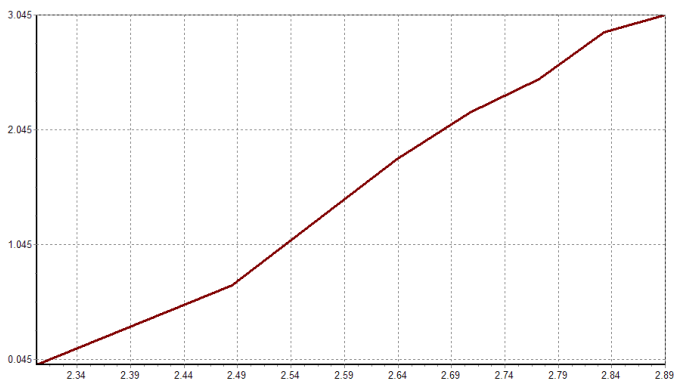


Рис. 2. График зависимости всех повреждений от времени

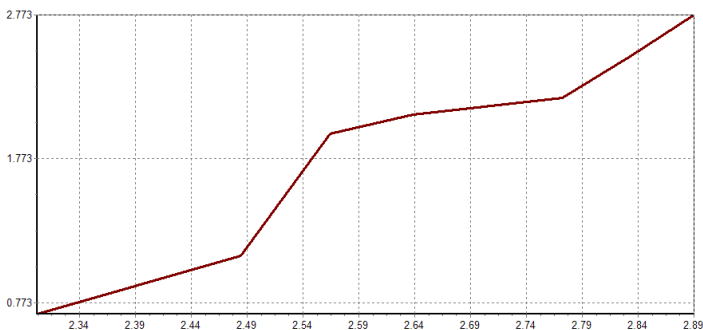


Рис. 3. График зависимости всех повреждений от времени, построенный в логарифмической шкале с отклонением от прямой линии в средней части

Был проведен анализ причин, вызывающих эти отклонения, и построены алгоритмы фильтрации точек и аппроксимации зависимости числа повреждений (рис. 4), числа свищей и разрывов, количества и длины ЛВР от времени и определены внутренние параметры алгоритмов.



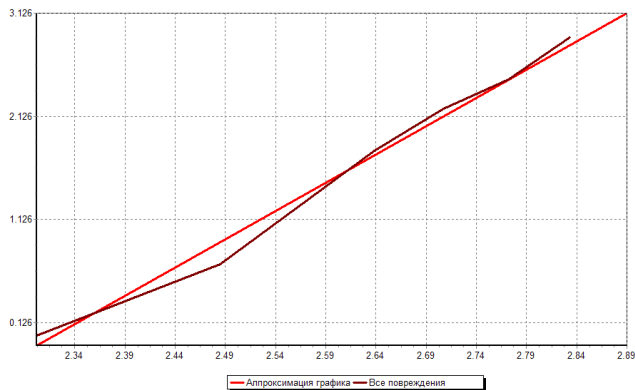


Рис. 4. График зависимости всех повреждений от времени и его аппроксимация

### 3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА РАЗРЫВОВ И СВИЩЕЙ, ПРИХОДЯЩИХСЯ НА ПЕРИОД ЗИМНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Из-за малого количества зимних разрывов и свищей (10% от общего числа) и отсутствия зависимости числа зимних разрывов от общего числа разрывов эта функция была построена с помощью методов усреднения. То есть зимние разрывы на всей теплосети распределялись между участками пропорционально количеству разрывов на каждом участке.

При этом также учитывалось, какой метод диагностики применялся на участке для выявления аномальных зон. У каждой методики диагностики, а также у комбинаций методик могут существовать два типа ошибок. Ошибки первого типа ( $K^+$ ) связаны с повреждениями, которые не удалось обнаружить с помощью выбранной методики, т.е. на самом деле повреждение есть, но при диагностике оно не было выявлено, а ошибки второго типа ( $K^-$ ) – с «ложными срабатываниями», т.е. на самом деле повреждения нет, но диагностика показала аномалию в этом месте. Определим коэффициенты  $K^-$  и  $K^+$  следующим образом: пусть на участке имеется  $n$  повреждений. В результате диагностики было выявлено  $n_d$  аномалий, из которых после проверки,  $n_{dr}$  аномалий оказались повреждениями. Тогда

$$(3) \quad K^- = \frac{n - n_{dr}}{n}; K^+ = \frac{n_d - n_{dr}}{n}.$$

Будем считать, что найденные повреждения, а также обнаружение ошибок «ложного срабатывания» проводятся в летний период, а найденные повреждения (ошибки первого типа) проявляются и ремонтируются в зимний период.

По имеющейся статистике отдельно для разрывов и свищей были определены значения  $K^-$  и  $K^+$  для наиболее распространенных способов диагностики.

Тогда функцию  $N_{Hgap}(t)$  (число разрывов в зимний период, произошедших за  $t$  лет) можно определить следующим образом:  $N_{Hgap}(t) = K^-_{gap} N_{Gap}(t)$ , где  $N_{Gap}(t)$  – общее число разрывов. Аналогично число свищей в зимний период, произошедших за  $t$  лет:  $N_{Hhol}(t) = K^-_{hol} N_{hol}(t)$ , где  $N_{hol}(t)$  – общее число свищей.

#### **4. Построение функции $S(t)$ , определяющей суммарные затраты на обслуживание по заданному временному интервалу**

Введем следующие обозначения:

$S_{serv}(t)$  – стоимость обслуживания участка за  $t$  лет;

$C_{rep}(l)$  – стоимость замены участка длиной  $l$  метров;

$S(t) = S_{serv}(t) + C_{rep}(l)$  – общие суммарные затраты на эксплуатацию участка при условии, что через  $t$  лет была проведена его замена.

Общая стоимость обслуживания участка  $S_{serv}(t)$  складывается из затрат на диагностику  $S_d(t)$ , затрат  $S_r(t)$  в период ремонтных работ и затрат  $S_e(t)$  в период эксплуатации:  $S_{serv}(t) = S_d(t) + S_r(t) + S_e(t)$ .

С помощью полученных в разделе 3 функций  $N_{all}(t)$ ,  $N_{seg}(t)$ ,  $L_{seg}(t)$ ,  $N_{Hgap}(t)$  и  $N_{Hhol}(t)$  были построены необходимые стоимостные функции и получено выражение функции зависимости общих суммарных затрат на обслуживание участка теплопровода  $S(t)$  в течение  $t$  лет, при условии, что через  $t$  лет будет проведена замена участка.

## **5. Определение комплексного технико-экономического показателя состояния участка, оптимального времени его замены и оптимального метода диагностики**

### **5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЗАМЕНЫ УЧАСТКА**

Как и в работе [8], оптимальный период замены участка  $T_0$  определялся как момент времени, в котором функция

$$S_y(t) = \frac{S(t)}{t} - \text{удельные суммарные затраты на эксплуатацию и}$$

плановую замену участка – достигает своего минимума.

### **5.2. РАСЧЕТ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ**

Определим комплексный технико-экономического показатель следующим образом. Комплексный показатель  $\omega$  – это величина в полуинтервале  $(0; 1]$ ; для двух участков с показателями  $\omega_1$  и  $\omega_2$  отношение  $\omega_1 > \omega_2$  свидетельствует о том, что второй участок нуждается в замене в большей степени, чем первый. Значение показателя  $\omega$ , равное единице соответствует тому, что участок не нуждается в замене, а  $\omega < 1$  – тому, что его замена является выгодной и целесообразной. Определим

$$(4) \quad \omega = \begin{cases} 1, & t < T_0, \\ \frac{S_y(T_0)}{S_y(t)}, & t \geq T_0. \end{cases}$$

где  $t$  – срок службы участка на момент расчета комплексного показателя.

Значение показателя имеет реальный физический смысл: при  $\omega < 1$  величина  $1/\omega$  показывает, во сколько раз больше расходуется средств на обслуживание участка, если его заменить в момент  $t$ , по сравнению с его заменой в оптимальный период  $T_0$ .

### 5.3. ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ДИАГНОСТИКИ

При составлении оптимального диагностического плана учитываются следующие основные характеристики каждого метода диагностики: стоимость проведения, точность обнаружения повреждений и величина срока продления (количество лет на который продлевается эксплуатация участка после выполнения всех ремонтных работ). Точность обнаружения повреждений можно задавать двумя параметрами  $K^-$  и  $K^+$ , описанными в разделе 3.3, величина срока продления приводится в каждой диагностической методике. Наиболее распространены три метода диагностики: опрессовка, комплексная диагностика (методы акустической и магнитной томографии [13]) и внутритрубная диагностика. Так как опрессовка всех участков должна проводиться каждый год, рассматривались три варианта диагностики: опрессовка, «комплексная диагностика + опрессовка» и «внутритрубная диагностика + опрессовка».

В качестве критерия оптимального варианта диагностики было выбрано значение удельных затрат на обслуживание участка в течение срока продления:  $\frac{S_{serv}(t + \tau) - S_{serv}(t)}{\tau}$ , где

$\tau$  – величина срока продления,  $t$  – срок службы участка. Соответственно, вариант диагностики, при котором значение удельных затрат минимально, считается наиболее оптимальным.

## 6. Выводы

1. Анализ этапов жизненного цикла участка показал, что управленческие решения происходят на стадиях составления плана работ по диагностике и комплексной оценки состояния участка. Необходимые при информационной поддержке управленческих решений методики должны содержать алгоритмы определения комплексного технико-экономического показателя состояния участка, оптимального времени его замены и оптимального метода диагностики. Для их определения необходимо найти функцию  $S(T)$  – суммарные затраты на обслуживание

участка за время  $T$  при условии, что в момент  $T$  будет проведена его плановая замена;

2. Для построения  $S(t)$  разработаны алгоритмы построения зависимости от времени для следующих величин: общее количество повреждений, общее количество локально-вставочных ремонтов (ЛВР), общая длина ЛВР, общее количество свищей и разрывов, произошедших в период зимней эксплуатации;

3. На основе полученной функции  $S(t)$  были разработаны все необходимые методики информационной поддержки управленческих решений, перечисленные в п.1.

### **Литература**

1. БАРЗИЛОВИЧ Е.Ю., БЕЛЯЕВ Ю.К. и др. *Вопросы математической теории надежности* / Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983.
2. БАРЛОУ Р., ХАНТЕР Л. *Оптимальный порядок проведения профилактических работ. Оптимальные задачи надежности* / Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Наука, 1968.
3. ГЕРЦБАХ И. *Теория надежности (с приложениями к профилактическому обслуживанию)*. – М.: Нефть и газ (Изд-во РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина), 2003.
4. ГНЕДЕНКО Б.В., БЕЛЯЕВ Ю.К., СОЛОВЬЕВ А.Д. *Математические методы в теории надежности*. – М.: Наука, 1965.
5. ГОСТ 27.002-89 *Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения*.
6. ГРИГАН А.М. *Управленческая диагностика: теория и практика*. – Ростов н/Д.: Изд-во РСЭИ – 2009. – С. 128–131.
7. КОЧЕРГА В.Г. *Основы теории надежности оборудования нефтегазовых объектов. Учебное пособие*. – Хабаровск: ДВГУПС, 2014.
8. КРЫГИН А.А. *Оптимизация графиков плановых ремонтов совокупности участков инженерных сетей* // Автоматика и телемеханика. – 2010. – №9. – С. 83–102.
9. МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ №565. МИНИСТЕРСТВО РЕГИОНАЛЬНОГО

РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ №667. ПРИКАЗ ОТ 29.12.2012 «Об утверждении методических рекомендаций по разработке схем теплоснабжения».

10. ОАО «ГАЗПРОМ ПРОМГАЗ» *Методика и алгоритм расчета надежности тепловых сетей при разработке схем теплоснабжения городов.* – Москва, 2013.
11. РД 26.260.004-91. *Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации.*
12. САВИН В.Н. *Надежность трубопроводов и сосудов высокого давления АЭС // Сборник научных трудов / Под ред. Острейковского В.А.* – Обнинск: Институт атомной энергетики, 1989. – С. 68–73.
13. САМОЙЛОВ Е.В. *Акустическая томография – метод диагностики трубопроводов.* – М.: «Новости теплоснабжения», 2014.
14. СЕННОВА Е.В., СМИРНОВ А.В., ИОНИН А.А. и др. *Надежность систем энергетики и их оборудования: Справочное издание в 4 т. под ред. акад. Ю.Н. Руденко. Т. 4 Надежность систем теплоснабжения.* – Новосибирск: Наука, 2000.
15. ХЕНЛИ Э., КУМАМОТО Х. *Надежность технических систем и оценка риска.* – М.: Машиностроение, 1984.

## **CALCULATING AND ANALYTICAL METHODS OF CONTROLLING THE SERVICE OF EXPANDED ENGINEERING NETWORKS**

**Andrey Krygin**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Cand.Sc.  
(andreykr@yandex.ru).

*Abstract: The paper continues the study of the repair work optimization problem for engineering networks and is devoted to the application of these results for the practical assessment of the network section state and information support for decision making about extension of its service life. Three tasks were formulated for this: determining the optimal replacement period of the network's section, determining the integrated technical and economic indicator of the section status and selecting the best method for its diagnosis. These tasks were solved using the example of a heat supply network. During the study, it is became necessary to disclose in more detail some issues of repair optimization of engineering network sections, concerning section life cycle analysis and damage flow modeling in order to determine the dependency function of the total cost for maintenance from the time. It was shown that the damages flow on the heat pipeline section is described quite accurately by the Weibull distribution. The construction methods for dependency functions of the total number of damages and total maintenance costs from the time, using statistical data about section damages are suggested. A criteria for the best diagnostic method, a complex indicator, and the optimal period of a section replacing as a point of time at which the unit costs for its maintenance reach their minimum were constructed using this function.*

**Keywords:** optimization of repairs of heat network sections, definition of a complex indicator of the site's condition, optimization of diagnostics of heat networks.

УДК 338.49

ББК 31.38

DOI: 10.25728/ubs.2019.78.10

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии Э.Ю. Калимулиной.*

*Поступила в редакцию 28.11.2017.  
Опубликована 31.03.2019.*