

# МОДУЛЬ РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МИНИМИЗАЦИИ СТОИМОСТИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА ТРУБОПРОВОДНЫХ СЕТЯХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИНФРАСТРУКТУРЫ

Крыгин А.А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,*

*Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

andreyakr@yandex.ru

*Аннотация: Исследуются вопросы минимизации стоимости ремонтных работ на участках инженерных сетей и задачи практической оценки состояния участков при информационной поддержке принятия решения о продлении срока службы участка на примере сети теплоснабжения.*

Ключевые слова: информационная поддержка планирования ремонтов участков инженерных сетей, определение комплексного показателя состояния участка, оценка параметров распределения Вейбулла при малом объеме выборки.

## 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, невозможно без системы информационной поддержки принятия решений (СИППР), которая является составной частью цифрового двойника инженерной сети. СИППР предоставляет 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 и их объектов, не позволяющих использовать современные методики и программные продукты без их серьезной адаптации под предметную область. В данной работе исследовались вопросы планирования ремонтных работ для протяженных участков сети теплоснабжения. В процессе анализа этапов планирования выявлено две задачи, решение которых необходимо для построения цифрового двойника сети:

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

Очевидно, что при решении этих задач нужно 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. Т.к. в данной работе исследуются протяженные участки сетей теплоснабжения, то из второй группы выбирались работы, посвященные оценке надежности трубопроводов.

Анализ работ [1-5] позволяет сделать вывод, что методы оценки и прогнозирования технического состояния объектов хорошо разработаны как в общем виде, так и для трубопроводов в ряде отраслей. Однако для нахождения оптимального времени плановой замены участка теплосети (и других поставленных в этой работе задач) этого недостаточно. При решении этих задач необходимо оценивать не только техническое состояние участка, но и проводить экономическую оценку, сопоставляя убытки при возникновении повреждения, расходы на диагностику, обслуживание и замену участка, при реализации различных управленческих решений. Анализ методик определения остаточного ресурса участка тепловой сети [6,7] показал, что, во-первых, в них всегда используются эмпирические методы, а во-вторых, не учитываются экономические факторы.

В работе [8] предложена методика определения оптимального времени замены участка инженерной сети. В качестве критерия оптимальности выбран минимум функции зависимости общих удельных затрат  $S_y(T) = S(T)/T$  от времени проведения капитального ремонта (замены участка)  $T$ .

Для предложенной математической модели было показано существование и единственность оптимального времени замены  $T_0$ , соответствующего минимуму удельных затрат. Следовательно, проведение капитального ремонта с периодом, отличающимся от  $T_0$  является нецелесообразным, т.к. такая стратегия соответствует более высоким затратам на обслуживание участка, а сам момент

времени  $T_0$  соответствует предельному (по ГОСТ 27.002-89 [9]) 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, которые, благодаря собранным статистическим данным, выполнены на примере теплосети:

- Анализ этапов жизненного цикла участка;
- Моделирование потока повреждений с помощью вероятностного распределения;
- Построение функции  $S(T)$  - суммарных затрат на обслуживание участка за время  $T$ ;
- Определение комплексного технико-экономического показателя состояния участка и оптимального времени его замены с помощью полученной функции  $S(T)$ ;
- Построение функции  $S(T)$  при малом объеме статистики повреждений на участке.

## 1 Основные этапы жизненного цикла участка теплопровода

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

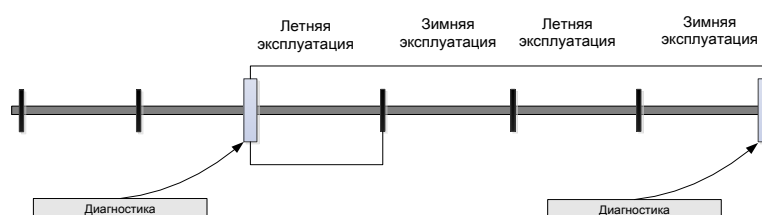


Рис. 1. Этапы жизненного цикла участка теплопровода

Жизненный цикл состоит из трех повторяющихся этапов: диагностики, летней и зимней эксплуатации и завершается капитальным ремонтом участка. При построении функции  $S(T)$  необходимо рассчитать затраты на перечисленных этапах. 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.

## 2 Моделирование потока повреждений с помощью вероятностного распределения

Идея алгоритма моделирования потока повреждений заключается в следующем: время до возникновения повреждения на участке можно рассматривать как случайную величину, описываемую с помощью распределения Вейбулла:  $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^c}$  с параметрами  $b$  и  $c$ . В работе [4] было показано, что распределение Вейбулла хорошо подходит для описания потока повреждений в трубопроводах. Переставляя слагаемые и логарифмируя два раза это равенство, получим:

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

Обозначим  $N(t) = -\ln(1 - F(t))$ ; как было показано в [8],  $N(t)$  равно среднему числу повреждений за время  $t$ .

При наличии полной статистики повреждений, оценки параметров  $b$  и  $c$  можно получить следующим образом: методом наименьших квадратов определяются коэффициенты прямой линии  $y = m \cdot x + n$  по точкам  $(x, y)$ , где  $x$  соответствует логарифму числа прошедших лет с момента эксплуатации участка, а  $y$  - логарифму общего числа повреждений. Тогда параметры  $b$  и  $c$  распределения Вейбулла определяются по следующим формулам:

$$\begin{cases} b = e^{-\frac{n}{m}} \\ c = m \end{cases} \quad (2)$$

На основе имеющейся статистики повреждений показано, что вероятность возникновения аварии на теплопроводах описывается распределением Вейбулла достаточно точно и графики зависимости общего количества повреждений, общего количества ЛВР и общей длины ЛВР от времени, построенные в логарифмических шкалах хорошо аппроксимируются прямой линией. Для ряда участков с существенными отклонениями от прямой, проведен анализ причин, вызывающих эти отклонения. В результате построены алгоритмы предварительной фильтрации точек и аппроксимации всех необходимых для вычисления  $S(T)$  зависимостей (рис. 2).

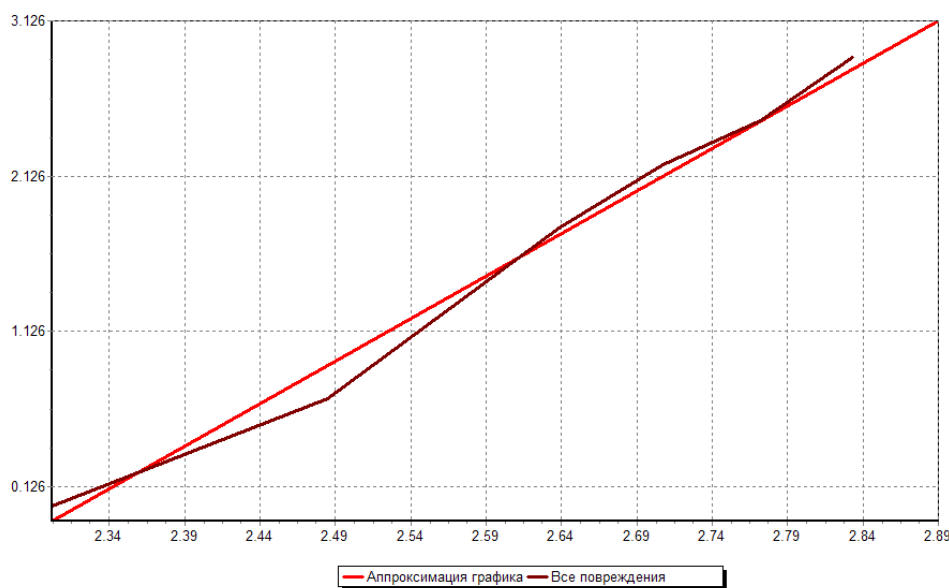


Рис. 2. График зависимости всех повреждений от времени и его аппроксимация, построенный в логарифмических шкалах

### 3 Построение функции $S(T)$

Получено выражение для функции зависимости от времени общих затрат на обслуживание участка теплопровода  $S(T)$ , при условии, что через  $T$  лет будет проведена замена участка. Эта функция складывается из стоимости обслуживания участка на этапах диагностики, зимней и летней эксплуатации и стоимости его замены. При определении  $S(T)$  была поставлена цель: максимально учитывать все особенности обслуживания и эксплуатации теплосетей. С помощью этой функции определены значения комплексного технико-экономического показателя состояния участка и оптимального времени его замены.

### 4 Определение оптимального времени замены участка

Как и в работе [8], оптимальный период замены участка  $T_0$  определялся как момент времени в котором  $S_y(T) = S(T)/T$  - функция удельных суммарных затрат на обслуживание и плановую замену

участка достигает своего минимума. Формула (3) показывает зависимость удельных затрат от времени для одного из участков, на рисунке 3 показан график этой зависимости.

$$S_y(T) = \frac{77484070 + 32625 \cdot T + 73.86 \cdot T^{4.05} + 11704 \cdot T^{2.24} - 14 \cdot T^{3.08} - 13.11 \cdot T^{3.75}}{T} \quad (3)$$

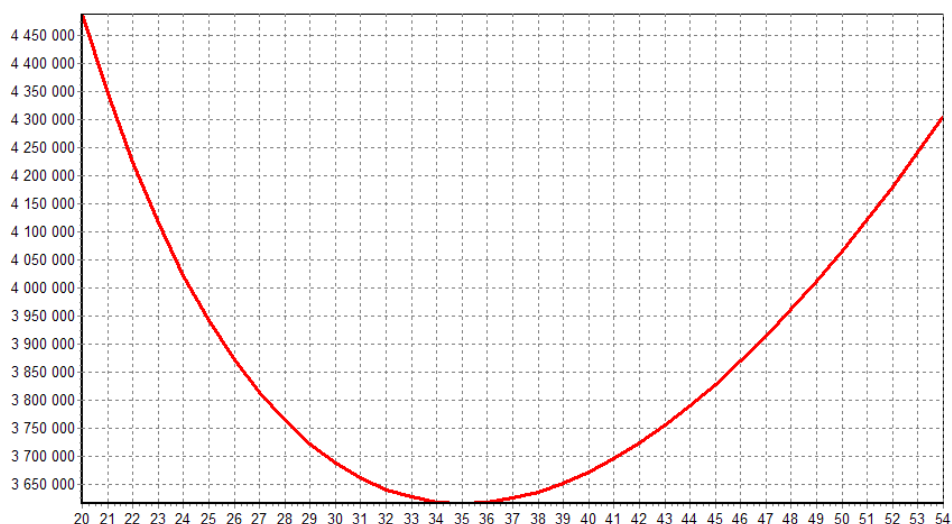


Рис. 3. График зависимости удельных затрат от времени замены участка

Из графика видно, что минимум  $S_y(T)$  достигается при  $T_0 = 35$ .

### 5 Определение комплексного технико-экономического показателя состояния участка

Комплексный показатель состояния участка  $\omega$  был определен как:

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

В формуле (4)  $t$  – 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  $T_0$ .

### 6 Построение функции S(T) при малом объеме выборки

База данных повреждений участков теплосети, по которой разрабатывалась методика определения оптимального времени замены и комплексного показателя состояния участка, велась на протяжении 15-ти лет. Для многих участков статистика повреждений имела только за последние несколько лет. Это обстоятельство потребовало дополнительного исследования методов оценки коэффициентов распределения Вейбулла для построения функции  $S(T)$  у таких участков. Исследование состояло из трех этапов:

- обзор и оценка точности известных алгоритмов оценки коэффициентов;
- дополнительная классификация участков по объему имеющейся статистики;
- разработка алгоритмов по каждому классу участков и построение общего алгоритма оценки коэффициентов.

Рассматривались три алгоритма оценки коэффициентов, одним из которых был ранее рассмотренный алгоритм [8]. Был выбран участок с большим объемом статистики, которую разделили на 9 точек. То есть на этом участке за все время наблюдения было 9 лет (не обязательно подряд идущих) в течение которых на нем возникали повреждения. Для этого участка оценка точности проводилась следующим образом:

- из 9-ти имеющихся точек рассматривалась искусственно ограниченные статистики повреждений из 8-ми, 7-ми, ..., 3-х и 2-х точек;
- для каждой искусственно ограниченной статистики каждым из трех алгоритмов определялись коэффициенты распределения Вейбулла для общего количества повреждений, общего количества локально-вставочных ремонтов (ЛВР) и общей длины ЛВР;
- строилась функция  $S_y(T)$  и определялся период оптимальной замены участка  $T_0$  с точностью до года.

Оценка коэффициентов ограниченной статистики считалась достаточно точной, если определенная для нее величина  $T_0$  отличалась от величины  $T_0$ , определенной по всем точкам не более, чем на 2 года (срок в течение которого осуществляется капитальный ремонт участка).

Были получены следующие результаты сравнения алгоритмов: наилучшим алгоритмом является алгоритм, предложенный в [8], он дает (с достаточной точностью) решение задачи оценки коэффициентов распределения Вейбулла для определения комплексного технико-экономического показателя состояния участка и оптимального времени его замены, если в имеющейся по участку статистике повреждений больше 7-ми точек. Такие участки были названы участками с достаточно полной статистикой.

Участки с объемом статистики меньше 7-ми точек были разделены еще на 2 подмножества: к первому были отнесены те участки, для которых объем имеющейся статистики повреждений настолько мал, что не дает никакой дополнительной информации; это подмножество было названо «участки без статистики повреждений». Ко второму подмножеству были отнесены все остальные рассматриваемые участки, оно было названо «участки с малым объемом статистики».

## 7 Оценка коэффициентов распределения Вейбулла для участков без статистики повреждений

1. Единственным методом оценки для таких участков является использование усредненных по другим участкам (с достаточно полной статистикой) коэффициентов. Расчет усредненных коэффициентов выполнялся следующим образом:
2. Множество участков с достаточно полной статистикой разбивалось на 44 группы: 11 по диаметру и 4 по типу канала (непроходной, полупроходной, проходной канал и наземная прокладка) и дальнейшие операции выполнялись по каждой из групп;
3. Было введено понятие «аномального участка»: участок, у которого по тем или иным причинам (включая ошибки при вводе данных по ремонтам) слишком много повреждений и локально-вставочных ремонтов. Такие участки встречались редко, но сильно искажали значения усредненных коэффициентов. При определении коэффициентов «аномальные участки» исключались. Критерием «аномальности» было выбрано значение удельной (по длине участка) суммарной длины локально-вставочных ремонтов;
4. Для каждой группы с исключенными аномальными участками заполнялся двухмерный массив, номер элемента соответствовал году эксплуатации и содержал в одной ячейке суммарное количество повреждений за этот год, а в другой – суммарную длину участков по которым в этот год велось наблюдение. Тогда отношение суммарного количества повреждений к суммарной длине в  $i$ -м элементе массива равняется усредненному числу повреждений на  $i$ -м году эксплуатации для участка длиной 1 метр.

Далее, по алгоритму из [8] определялись коэффициенты распределения Вейбулла.

На рисунке 4 приведен пример графика зависимости (в логарифмических шкалах) общего числа повреждений от времени для участков с диаметром 500 мм., расположенных в проходных каналах и его аппроксимация.

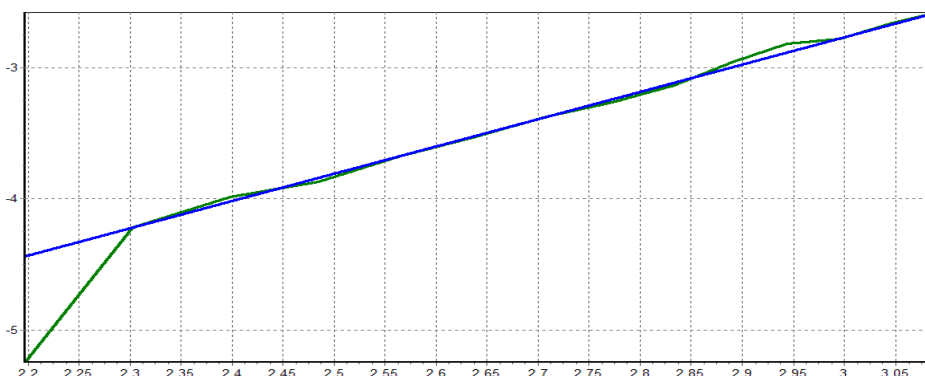


Рис. 4. Пример графика зависимости (в логарифмических шкалах) общего числа повреждений от времени и его аппроксимация прямой линией

## 8 Оценка коэффициентов распределения Вейбулла для участков с малым объемом статистики повреждений

Идея алгоритма оценки коэффициентов для участков с малым объемом статистики заключалась в использовании данных по некоторому множеству других участков, чтобы компенсировать недостаток информации. Было определено понятие «похожий участок» и общая схема алгоритма была следующей:

- из группы участков, диаметр и способ прокладки которых совпадают с рассматриваемым участком, выбирались «похожие участки»;
- к «множеству похожих участков» добавлялся рассматриваемый участок и по получившемуся множеству оценивались коэффициенты распределения Вейбулла, алгоритмом, описанным в разделе 7.

На рисунке 5 показана схема заполнения массива для оценки коэффициентов, по участку, наблюдение за которым проходило в период  $(t_1; t_2)$ .

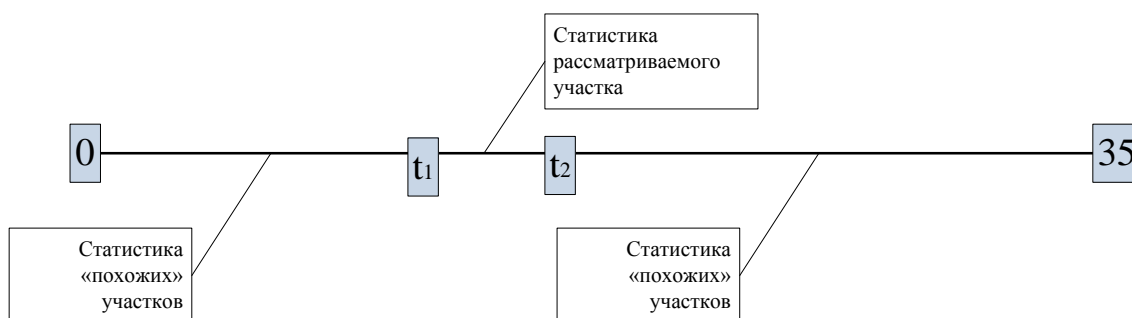


Рис. 5. Схема заполнения массива

Критерий, по которому участок той же группы считается «похожим» на рассматриваемый участок был выбран следующий. Пусть в течение периода наблюдения за рассматриваемым участком  $(t_1; t_2)$  на нем произошло  $R$  повреждений. Считается, что участок «похож» на рассматриваемый участок, если в период эксплуатации  $(t_1; t_2)$  количество повреждений на один метр лежит в интервале  $\left[\frac{R}{l} \cdot (1 - \Delta); \frac{R}{l} \cdot (1 + \Delta)\right]$ , где  $l$  – длина рассматриваемого участка, а  $\Delta$  – параметр в промежутке  $[0;1)$ , задающий ширину этого интервала.

Этот критерий хорошо иллюстрируется следующим рисунком (рис. 6): рассмотрим плоскость  $b - c$ , соответствующую удельным (для 1-го метра) параметрам распределения Вейбулла для различных участков. Определим численными методами такую область (она показана черным цветом), что любая ее точка с координатами  $(b, c)$  удовлетворяет сформулированному критерию, т.е. участок с такими параметрами «похож» на рассматриваемый. Также на этом графике поставим точки, координаты которых  $(b, c)$  соответствуют параметрам участков с достаточно полной статистикой из той же группы (они показаны серым цветом).

Из рисунка сразу видно множество «похожих» участков – участки, координаты которых попали в черную область. Значение параметра  $\Delta = 0.4$  было определено опытным путем. Также опытным путем была найдена граница применимости между методом похожих участков и методом усредненных коэффициентов. Общий алгоритм оценки коэффициентов распределения Вейбулла можно сформулировать так:

- если количество точек  $N \geq 7$ , то следует использовать алгоритм, предложенный в [8], при этом в большинстве случаев будет достигнута необходимая точность полученных оценок;
- если  $4 \leq N \leq 6$ , то следует использовать метод похожих участков, при этом необходимая точность полученных оценок не достигается, отклонение может составлять около 30%;
- если  $N \leq 4$ , то следует использовать метод усредненных коэффициентов, при этом необходимая точность полученных оценок не достигается.

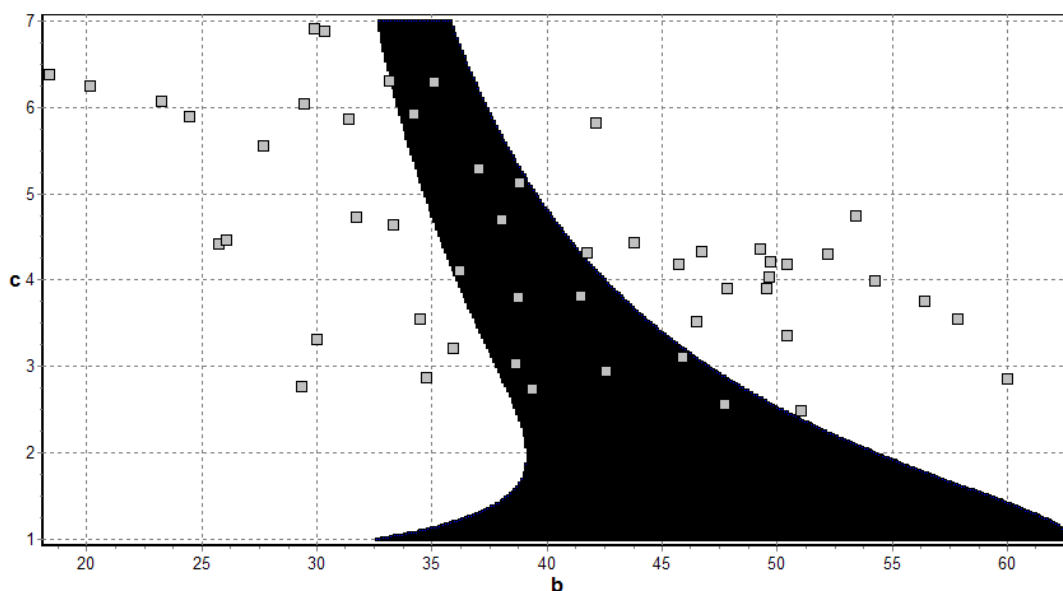


Рис. 6. Пример области «похожих» участков и параметров  $(b, c)$  участков с достаточно полной статистикой

## Заключение

1. Анализ этапов жизненного цикла участка показал, что управленческие решения происходят на стадиях составления плана работ по диагностике и комплексной оценки состояния участка. Необходимые инструменты при создании цифрового двойника инфраструктуры должны содержать алгоритмы определения комплексного технико-экономического показателя состояния участка и оптимального времени его замены. Для их определения необходимо найти функцию  $S(T)$  - зависимости общих затрат на обслуживание участка от времени проведения планового ремонта  $T$ ;
2. Разработан алгоритм построения функции  $S(T)$ , в котором максимально учитывались все особенности обслуживания и эксплуатации теплосетей;
3. На основе полученной функции  $S(T)$  были разработаны все необходимые методики информационной поддержки управленческих решений, перечисленные в п.1.

Область применения алгоритма расширена на случаи участков с неполной статистикой повреждений.

## Литература

1. Барзилович Е.Ю., Беляев Ю.К. и др. Вопросы математической теории надежности/Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376с.
2. Герцбах И. Теория надежности (с приложениями к профилактическому обслуживанию). – М.: Нефть и газ (Изд-во РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина), 2003. – 263с.
3. Кочерга В.Г. Основы теории надежности оборудования нефтегазовых объектов. Учебное пособие. – Хабаровск.: ДВГУПС, 2014. – 98с.
4. 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.
5. Хенли Э., Куamoto Х. Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984. – 528с.
6. Сеннов Е.В., Кириухин С.Н. Методика и алгоритм расчета надежности тепловых сетей при разработке схем теплоснабжения городов. – М.: ОАО «Газпром промгаз», 2013. 104с.
7. МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. ПРИКАЗ N 565 от 29.12.2012. Об утверждении методических рекомендаций по разработке схем теплоснабжения.
8. Крыгин А.А. Оптимизация графиков плановых ремонтов совокупности участков инженерных сетей. М.: Автоматика и телемеханика. 2010. №9. С. 83-102.
9. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.