



## ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАФИКОВ ПЛАНОВЫХ РЕМОНТОВ СОВМЕСТНО РАСПОЛОЖЕННЫХ УЧАСТКОВ ТЕПЛОСЕТИ С УЧЕТОМ ПРАКТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ

А.А. Крыгин (Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН)

Рассматриваются вопросы, возникающие при решении практической задачи определения оптимального срока службы протяженного участка теплосети. Приводятся математическая модель и основные алгоритмы нахождения оптимальных графиков ремонта для одного и двух совместно расположенных протяженных участков теплопровода. На примере четырех совместно расположенных участков проводится расчет оптимальных сроков их ремонта и оценка экономической выгоды.

Ключевые слова: плановые ремонты, теплосети, математическая модель, экономическая выгода.

### Введение

В комплексе задач управления теплоснабжением крупного города одним из основных направлений является достижение требуемого уровня эффективности эксплуатационной деятельности ремонтно-строительных организаций и коммунальных служб. Важнейшим аспектом в этой задаче является планирование ремонтных работ на теплосетях.

Качественный скачок в аналитическом обеспечении решения указанной задачи, возможный благодаря современным вычислительным средствам, не наблюдается по ряду причин, важнейшими из которых являются, во-первых, недостаток моделей и методик планирования ремонтов, учитывающих особенности такого объекта, как сеть теплоснабжения. И, во-вторых, отсутствие системы информационной поддержки принятия решений, позволяющей предоставить адекватные и актуальные данные о сети и ее отдельных объектах для принятия решений в процессе планирования ремонтных работ.

Первым этапом планирования является составление списка ремонтируемых объектов. Для проведения этой операции необходима методика определения оптимального срока службы протяженного участка теплосети.

Данная работа посвящена практическому применению теоретической методики, изложенной в [1].

### Модели обслуживания теплопровода для определения оптимального графика ремонтных работ

В работе [1] предложена экономико-статистическая методика, которая базируется на следующих допущениях и моделях.

Среди проводимых на теплопроводах ремонтных работ можно выделить два основных вида.

*Плановый (капитальный) ремонт.* Этот вид ремонта проводится с целью предупреждения износа сетей и предотвращения аварий. Он осуществляется периодически по заранее составленному плану и заключа-

ется в проведении разрытий и полной или частичной замене участков большой протяженности.

*Аварийный ремонт.* Этот вид ремонта производится в случае обнаружения повреждения, в результате которого нарушается технологический режим работы сети.

Общие финансовые затраты на проведение ремонтных работ складываются из стоимостей аварийных и плановых ремонтов.

Для составления математической модели обслуживания одного участка теплопровода были приняты следующие допущения.

#### *Плановый ремонт:*

— стоимость планового ремонта участка является постоянной величиной и не зависит от календарного времени;

— время проведения планового ремонта пренебрежимо мало по сравнению со сроком службы участка.

#### *Аварийный ремонт.*

Исходя из того, что на момент возникновения аварии на участке влияет большое число факторов, таких как химический состав почвы, наличие электрических и температурных полей, вибраций и др., учитывать которые не представляется реальным, можно рассматривать время до возникновения аварии как случайную величину, которая описывается конкретным законом распределения. В [2] отмечается, что вероятность возникновения аварии за время  $t$  на таких объектах хорошо описывается с помощью распределения Вейбулла.

Аварии, возникающие на теплопроводе, локализованы по месту своего появления. Общая его протяженность может достигать нескольких километров, в то время как длина аварийного участка не превышает нескольких метров. Поэтому будем считать, что состояние всего теплопровода не изменяется после проведения на нем аварийного ремонта.

На основе этих допущений была составлена модель (рис. 1) процесса обслуживания теплопровода,

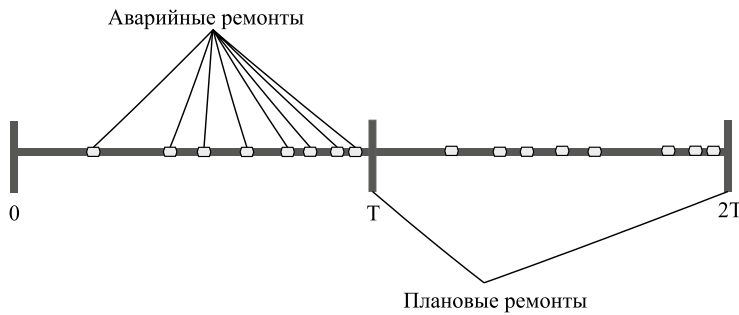


Рис. 1. Модель обслуживания теплопровода

состоящая из последовательного проведения плановых или аварийных ремонтов, стоимости которых обозначены  $S_p$  и  $S_a$  соответственно. Плановый ремонт производится с периодом  $T$ .

Рассмотрим два варианта процесса обслуживания с периодами  $T_1$  и  $T_2$ ; обозначим суммарные затраты в течение одного цикла, состоящие из стоимости нескольких аварийных и одного планового ремонта  $S(T_1)$  и  $S(T_2)$ . Для корректного сравнения этих вариантов перейдем от суммарных затрат к удельным затратам, то есть средним затратам в единицу времени,

$$S_y(T_1) = \frac{S(T_1)}{T_1}; S_y(T_2) = \frac{S(T_2)}{T_2}. \text{ Тогда вариант с меньшими удельными затратами является экономически более выгодным. Соответственно оптимальным периодом проведения плановых ремонтов (оптимальный срок службы теплопровода) является тот, у которого удельные затраты минимальны.}$$

При малых значениях периода  $T$  происходит замена теплопровода, который еще не выработал своего ресурса, поэтому затраты на его обслуживание будут неоправданно высокими за счет слишком частого проведения плановых ремонтов. При больших значениях  $T$  трубопровод с течением времени перейдет в ветхое состояние, что повлечет за собой большое число аварий и затраты на его обслуживание опять станут неоправданно высокими за счет частого проведения аварийных ремонтов. Интуитивно понятно, что между этими крайними случаями есть значение периода проведения

планового ремонта  $T_0$ , соответствующее минимуму удельных затрат. На рис. 2 показана зависимость удельных затрат от величины периода проведения плановых ремонтов, иллюстрирующая это рассуждение.

В результате доказательства ряда теорем в [1] было показано существование и единственность оптимального периода  $T_0$  и получена математическая зависимость между  $T_0$ , стоимостями аварийного и планового ремонтов  $S_p$ ,  $S_a$  и параметрами распределения Вейбулла.

Для нахождения оптимального графика плановых ремонтов двух и более совместно расположенных теплопроводов был введен дополнительный параметр  $R$  — «стоимость разрытия».

Будем считать, что стоимость планового ремонта состоит из двух частей: стоимости разрытия и стоимости замены. Стоимость разрытия включает затраты на разрытие и восстановление дорожного покрытия, убытки, связанные с закрытием движения, а стоимость замены — стоимость теплопровода, убытки при отключении участка от сети, стоимость проведения работ на самом участке. При проведении планового ремонта для двух участков одновременно стоимость разрытия включается в общую стоимость только один раз.

Тогда задачу нахождения оптимального графика можно сформулировать следующим образом. Для двух участков с заданными параметрами и уже описанным процессом обслуживания каждого из них требуется составить график плановых ремонтов каждого участка, отвечающий минимуму суммы удельных затрат. В ходе исследования этой задачи был получен алгоритм нахождения оптимальной последовательности плановых ремонтов двух участков.

#### Практический расчет оптимальных сроков ремонта

В качестве примера нахождения оптимальных сроков ремонта рассмотрим решение следующей практической задачи.

В коллекторе расположены четыре участка теплопровода (объектов), два (№ 1 и № 2) из которых передают горячую воду («прямая» и «обратная» ветви), два (№ 3 и № 4) — холодную («прямая» и «обратная» ветви). Объекты № 1 и № 2 одинаковы, то есть материал, размеры, марка теплопроводов, стоимость аварийного и планового ремонта и другие параметры у них совпадают. Теплопроводы № 3 и № 4 также одинаковы.

В табл. 1 и 2 представлены реальные данные по этим участкам до 2013 г. Требуется найти для них оптимальный график проведения плановых ремонтов на период 3 года, начиная с 2013 г. (табл. 1). В табл. 2 содержатся параметры участков теплопровода и стоимости работ.

#### Обработка статистических данных

Условия задачи основываются на реальных данных по авариям на теплосетях города, начиная с вы-

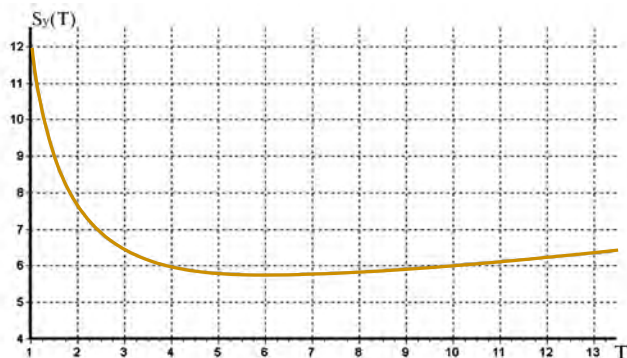


Рис. 2. График зависимости величины удельных затрат от периода плановых ремонтов для распределения Вейбулла

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^c}, \text{ при } b=1; C=1,4; S_p=10; S_a=2.$$

Таблица 1. Фрагмент статистических данных по ремонтам

1			2		
16.06.2006			13.06.2006		
22.02.2011			16.05.2011		
11.05.2011			17.05.2011		
12.05.2011			20.05.2011		
27.06.2012			04.07.2012		
20.08.2012			06.07.2012		

Примечание. В столбце «Тип ремонта» символы «А» и «П» соответствуют ликвидации аварии и плановому устранению повреждений

Таблица 2. Параметры участков и стоимости работ

	15.06.1981
	115
	600
1	
	1738913
	4118424
	9522
	138.5
	2.2
( 6 )	27216

бранного для исследования 2006 г. В табл. 1 аварии делятся на два типа: ликвидация аварийной ситуации и плановое устранение повреждений. При ликвидации аварии коллектор вскрывается каждый раз, при плановом устранении повреждений коллектор подвергался периодическому (примерно раз в год) вскрытию, осмотру и устранению повреждений. Отсюда следуют два вывода:

— точное время возникновения повреждений неизвестно, известно только, что повреждение произошло на интервале между двумя осмотрами, то есть примерно год;

— на основе приведенных данных необходимо оценить стоимость аварийного ремонта. В данном примере стоимость ремонтных работ, во-первых, определяется за период, а не за каждую аварию, в частности, при плановом устранении повреждений сумма стоимости земляных и дорожных работ включается в общую стоимость только один раз. Во-вторых, стоимость ремонтных работ за период напрямую зависит от числа заваренных свищей, поставленных заплат и замененных участков.

**Определение параметров распределения Вейбулла**

В работе [2] указано, что вероятность возникновения аварии на теплопроводе хорошо описывается распределением Вейбулла. При этом под термином «авария» в этом случае понимается любая течь теплопровода, то есть авариями являются свищи, протечки и т.д. Таким образом, в табл. 2 фактически приво-

дится число аварийных событий, прошедших за интервалы времени между двумя осмотрами. Упорядочим исходные данные по суммарному числу аварийных событий — табл. 3.

В табл. 3 приводятся интервалы времени проведения осмотров и общее число выполненных ремонтов. По таблице можно определить число аварийных событий, произошедших в период между двумя осмотрами.

Для нахождения значений параметров распределения Вейбулла использовалось соотношение между параметрами, временем и средним числом аварийных событий. В результате для каждого теплопровода была составлена и решена система из двух уравнений относительно параметров распределения Вейбулла  $b$  и  $c$ . В табл. 4 представлены результаты этих расчетов.

Так как теплопроводы попарно одинаковые, будем использовать усредненные значения коэффициентов:  $b_1=6496$ ;  $c_1=5648$ ;  $b_2=5648$ ;  $c_2=6,024$ .

Следует отметить, что полученные значения коэффициентов не являются точными, а представляют собой оценку сверху из-за отсутствия более детальной информации по проведенным работам. Например, заплата или замененный участок трубы могли устанавливаться на несколько свищей, и в этом случае чис-

Таблица 3. Суммарная статистика аварийных событий

1	16.06.2006	23.06.2006	2
1	15.05.2007	31.05.2007	6
1	04.07.2008	13.07.2008	4
1	27.05.2009	15.06.2009	3
1	09.06.2010	23.06.2010	6
1	11.05.2011	01.09.2011	10
1	07.06.2012	20.08.2012	9
2	13.06.2006	24.06.2006	3
2	22.05.2007	27.05.2007	4
2	02.07.2008	15.07.2008	5
2	13.05.2009	01.06.2009	4
2	02.06.2010	21.06.2010	7
2	15.05.2011	29.05.2011	8
2	20.06.2012	06.07.2012	11
3	16.05.2006	21.05.2006	4
3	18.05.2007	26.05.2007	4
3	04.07.2008	21.07.2008	8
3	11.06.2009	21.06.2009	6
3	08.06.2010	30.06.2010	9
3	16.05.2011	27.05.2011	10
3	26.05.2012	12.07.2012	13
4	14.06.2006	24.06.2006	5
4	19.05.2007	28.05.2007	5
4	11.07.2008	29.07.2008	7
4	23.06.2009	02.07.2009	7
4	17.06.2010	28.06.2010	7
4	22.05.2011	06.06.2011	9
4	25.06.2012	16.07.2012	13

ло аварий увеличивается. Поэтому вычисляемые далее по статистическим данным сроки оптимального планового ремонта получатся завышенными, то есть на самом деле ремонты следует проводить ранее рассчитанной даты.

Таблица 4. Расчеты коэффициентов распределения

	В	с
1	6479	6.88
2	6513	7.04
3	5749	6.18
4	5547	5.86

#### Определение стоимости аварийного ремонта и других параметров, необходимых для расчета

Оценим величину стоимости аварийного ремонта методом усреднения, то есть просуммируем все расходы на обслуживание всех теплопроводов и разделим на общее число аварий. Анализ статистических данных показал, что с 2006 по 2012 гг. коллектор вскрывался шесть раз для проведения осмотра и три раза для ликвидации последствий аварийной ситуации. Также за это время были заменены 13 участков трубы, 111 раз заварены свищи и 69 раз поставлены заплаты. Таким образом, средняя стоимость аварийного ремонта составляет  $S_a=2328$ .

Умножая удельную стоимость планового ремонта на длину теплопровода, получим  $S_p=473619$ ,  $R=199975$ .

Так как объекты попарно одинаковы, то задача сводится к нахождению оптимальных сроков ремонта двух объектов, примем  $\bar{S}_p = 2S_p$ ,  $\bar{S}_a = 2S_a$ , и  $\bar{F}(t) = F(t)$ . В дальнейшем изложении под «объектом» будет пониматься двоекный участок теплопроводов с параметрами  $\bar{S}_p = 947238$ ;  $\bar{S}_a = 4656$ .

#### Определение оптимальных сроков ремонта

Расчет оптимальных сроков ремонта в соответствии с предложенным в [1] алгоритмом дал следующие результаты.

Для первого объекта минимум удельных затрат достигается при  $T_1=11088,8$  (30 лет 4 мес.), для второго  $T_2=10784$  (29 лет 7 мес.). Оптимальным графиком ремонтов двух объектов является их одновременный ремонт с периодом 10818 дней, при этом удельные затраты (усредненные затраты на обслуживание двух объектов за один день) составляют 230,18 руб. Учитывая, что объекты были введены в эксплуатацию 15.06.1981 г., оптимальным являлся одновременный ремонт двух объектов (всех четырех участков теплопровода) 27.01.2011 г.

#### Оценка экономической эффективности

Из-за отсутствия оптимальной стратегии ремонта продолжалось проведение аварийных ремонтов, что вызвало рост затрат на эксплуатацию исследуемых объектов и наиболее выгодной стратегией в этом слу-

чае является скорейшее проведение одновременного планового ремонта всех четырех участков теплопровода.

Рассмотрим вариант, в котором в 2013 г. проводится одновременный ремонт всех участков, рассчитаем и сравним его общие финансовые затраты с оптимальными.

Затраты на оптимальный вариант складываются из общих затрат за период 15.06.1981–27.01.2011 и затрат на аварийные ремонты за период 27.01.2011–01.01.2013 и составляют 2490087 руб.

Затраты на предлагаемый вариант складываются из стоимости замены всех участков теплопровода, стоимости земляных работ для планового ремонта и уже вычислявшейся ранее общей стоимости всех проведенных аварийных работ. В сумме они составляют 2543758 руб.

Таким образом, оптимальный вариант оказался выгодней на 53671 руб.

Следует иметь в виду, что расчеты проводились для четырех участков теплопровода. Для оценки результатов применения оптимальной стратегии в масштабах города нужно умножить получившуюся разницу на четверть всех участков, что составляет несколько сотен тысяч.

#### Выводы

1. Отсутствие методического аппарата, программного обеспечения и архива статистических данных приводит к значительному перерасходу средств на ремонт теплосетей.

2. Предложена экономико-статистическая методика оптимального планирования ремонтов, основанная на вероятностном методе оценки износа, с помощью которой был проведен практический расчет оптимального графика ремонтов для четырех участков теплопровода.

3. Показано, что применение разработанной методики позволяет получить существенную экономическую выгоду за счет сокращения финансовых расходов на проведение ремонтных работ, уменьшения случаев повторных разрывов и снижения общего количества аварий.

#### Список литературы

1. Крыгин А.А. Оптимизация графиков плановых ремонтов совокупности участков инженерных сетей. Автоматика и телемеханика. 2010. №9. С. 83-102.
2. Савин В.Н. Надежность трубопроводов и сосудов высокого давления АЭС. Сборник научных трудов. Под ред. Острейковского В.А. Обнинск. Институт атомной энергетики. 1989 г. С. 68-73.

*Крыгин Андрей Александрович – канд. техн. наук, научный сотрудник  
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.  
Контактный телефон 8(495) 334-87-39.  
E-mail: andreyakr@yandex.ru*