

УДК 622.692.4:620.1

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТА НЕФТЕПРОВОДА ПО ДАННЫМ ДИАГНОСТИКИ

Харисов Р.А., Кантемиров И.Ф.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа  
кафедра «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ»  
e-mail: pipe-ufa@mail.ru*

Даминов И.А.

*ОАО «Уралсибнефтепровод», г.Уфа  
e-mail: usmn@ufa.transneft.ru*

Герасимов А.В.

*ООО «Безопасность эксплуатации сложных трубопроводных систем», г.Уфа*

**Аннотация.** В Российской Федерации находится в эксплуатации значительное число объектов трубопроводного транспорта. В настоящее время на уровень их надежности оказывает негативное влияние ряд факторов: сложные экономические условия, отсутствие достаточных инвестиций, неуклонное возрастание доли объектов, выработавших нормативный срок, а также с более жесткими режимами эксплуатации. В этих условиях предотвращение аварийных ситуаций и экологическая защита возможны только при своевременном проведении технической диагностики. Это определяет актуальность внедрения новейших методов неразрушающего контроля, обеспечивающих ускорение диагностирования, получение достоверной оценки технического состояния и обоснованного прогнозирования остаточного ресурса безопасной эксплуатации. Именно по результатам диагностического контроля устанавливаются объем капитального или выборочного ремонтов.

**Ключевые слова:** выборочный ремонт, планирование, оценка, эффективность, диагностика, нефтепровод, работоспособность

### 1. Постановка задачи

На практике, если учитывать только опасные на данный момент (первоочередные) дефекты, в основном они устраняются выборочным ремонтом. Участки капремонта можно выделить из следующих оценок. Пусть  $s_1$  – средняя стоимость выборочного устранения одного дефекта,  $s_2$  – средняя удельная стоимость капремонта с заменой трубы в данных условиях,  $\Delta n$  – число первоочередных дефектов на рассматриваемом участке длиной  $\Delta l$ . Тогда условием эффективности капремонта является:

$$\Delta n s_1 > \Delta l s_2 \quad (1)$$

или, средняя плотность опасных дефектов

$$\frac{\Delta n}{\Delta l} > \frac{s_2}{s_1} \quad (2)$$

Однако, при планировании капремонта на перспективу, нельзя ограничиваться опасными на данный момент дефектами. Со временем, при развитии остальных дефектов, на отдельных участках затраты на выборочный ремонт всех опасных дефектов могут превзойти затраты по капремонту этих участков. Следовательно, чтобы затраты на устранение опасных дефектов на предстоящий срок службы нефтепровода были минимальными, должен быть оптимальным выбор и сроков и методов ремонта отдельных участков с учетом развития дефектов во времени. Причем должны быть учтены дефекты как уже существующие, так и возникающие впоследствии.

В общем случае в результате технико-экономического обоснования рассматриваемый участок нефтепровода должен быть разделен на отдельные участки по видам и срокам ремонта (см. рис. 1). Критериями оптимальности такого деления следует считать восстановление уровня работоспособности отремонтированных участков до уровня бездефектных и минимальную суммарную стоимость ремонта всего рассматриваемого участка за весь период эксплуатации.

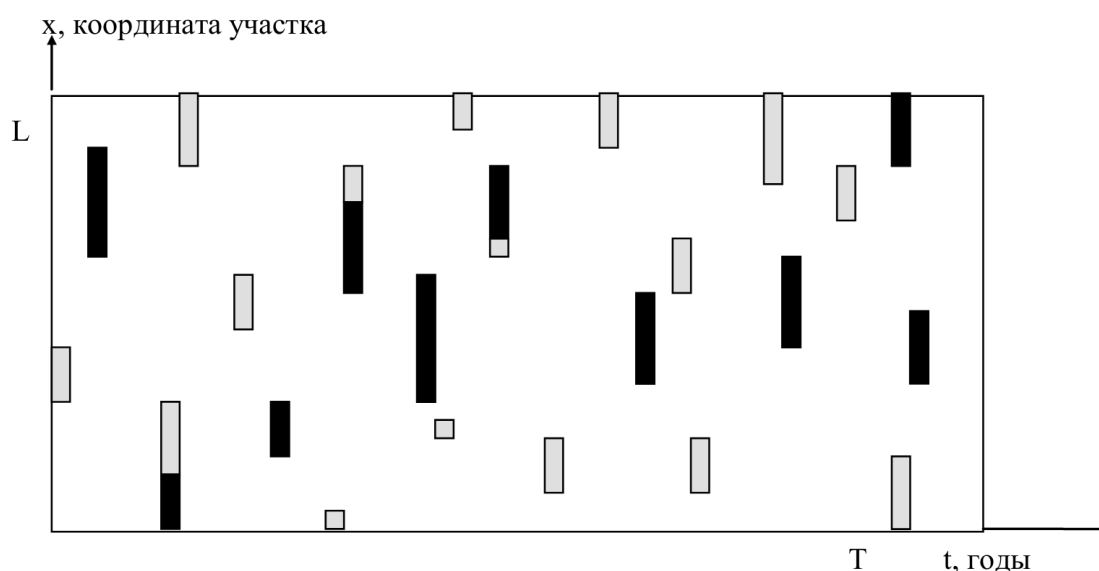


Рис. 1.

■ □ □ – различные виды ремонта;  
 L – общая длина участка нефтепровода;  
 T – полный срок службы нефтепровода

Можно сформулировать задачу следующим образом:

Известно распределение по времени и по длине нефтепровода количества дефектов, подлежащих устранению. Для каждого дефекта известны технически обоснованные методы устранения. Необходимо для каждого участка с устраняемым дефектом определить сроки и методы ремонта таким образом, чтобы суммарные затраты на ремонт на весь предстоящий срок службы нефтепровода были минимальными [1 - 5].

## 2. Оценка эффективности в общем случае.

Пусть  $n(x, t)$  – количество опасных дефектов, возникающих на 1 км нефтепровода в течение одного года (здесь  $x$  – расстояние в км;  $t$  – время в годах). Под словом «возникающих» подразумевается развитие дефектов до опасных размеров к данному моменту.

Если  $L$  – длина диагностируемого участка нефтепровода, то за  $T$  лет без учета ремонта появляется следующее количество опасных дефектов:

$$N_0 = \sum_{x=1}^L \sum_{t=1}^T n(x, t) . \quad (3)$$

Чтобы определить количество опасных дефектов с учетом ремонта, нужно учесть изменение количества опасных дефектов на всех участках, где проводится ремонт.

Пусть через  $t$  лет после начала эксплуатации проведен ремонт участка длиной  $\Delta l(x, t)$ . Тогда на этом участке количество появившихся до ремонта опасных дефектов будет

$$\Delta N_1 = \Delta l(x, t) \sum_{z=1}^t n(x, z) , \quad (4)$$

где под  $n(z)$  подразумевается зависимость по времени. Это количество входит в определенное в соответствии с формулой (3) значение  $N_0$ . Количество появившихся после ремонта опасных дефектов

$$\Delta N_2 = \Delta l(x, t) \sum_{z=1}^{T-t} n_i(x, z) , \quad (5)$$

где вид распределения  $n_i(x, z)$  зависит от вида проведенного ремонта. В частности, при замене трубы  $n_i(x, z) = n(x, z)$ .

Всего на участке длиной  $\Delta l(x, t)$ , отремонтированном в году  $t$  за  $T$  лет появится опасных дефектов в количестве

$$\begin{aligned} \Delta N &= \Delta N_1 + \Delta N_2 = \Delta l(x, t) \left( \sum_{z=1}^t n(x, z) + \sum_{z=1}^{T-t} n_i(x, z) \right) = \\ &= \Delta l(x, t) \left( \sum_{z=1}^T n(x, z) - \sum_{z=t}^T n(x, z) + \sum_{z=1}^{T-t} n_i(x, z) \right). \end{aligned} \quad (6)$$

В соответствии с этим и учетом (3) на всем участке диагностирования длиной  $L$ , с учетом капремонта, на выборочное устранение останется следующее количество опасных дефектов:

$$N = N_0 + \sum_{t=1}^T \Delta l(x, t) \left( \sum_{z=1}^{T-t} n_i(x, z) - \sum_{z=t}^T n(x, z) \right). \quad (7)$$

Перейдя к непрерывным зависимостям, можно записать:

$$N_0 = \int_0^L \int_0^T n(x, t) dt dx ; \quad (8)$$

$$N = \int_0^T \left( \int_0^L n(x, t) dx - \Delta l(x, t) \left( \int_t^T n_i(x, z) dz - \int_0^{T-t} n(x, z) dz \right) \right) dt. \quad (9)$$

Здесь под  $\Delta l(x, t)$  подразумевается зависимость длины  $\Delta l$  и места  $x$  участка капремонта от времени (года ремонта)  $t$ .

Пусть  $s_1$  – стоимость выборочного ремонта одного дефекта (средняя), а  $s_2$  – стоимость кап. ремонта 1 км нефтепровода. Тогда затраты на устранение дефектов определяются соотношениями:

$$S_0 = s_1 \cdot N_0 = s_1 \int_0^L \int_0^T n(x, t) dt dx \quad \text{– без учета уменьшения опасных дефектов при капремонте;}$$

$$S = s_1 \cdot N + s_2 \sum_{t=1}^T \Delta l(x, t) \quad \text{– с учетом капремонта.}$$

$$S = s_1 \int_0^T \left( \int_0^L n(x, t) dx - \Delta l(x, t) \left( \int_t^T n_i(x, z) dz - \int_0^{T-t} n(x, z) dz \right) \right) dt + s_2 \int_0^T \Delta l(x, t) dt. \quad (10)$$

Эффективность капремонта в общем случае оценивается путем сравнения затрат  $S_0$  и  $S$ . При  $S_0 > S$  кап. ремонт эффективен, а при  $S_0 < S$  неэффективен. Количественно эффект оценивается разницей  $(S_0 - S)$ , где  $S$  определяется путем минимизации выражения (10). Таким образом, условие эффективности капремонта [1 - 3]:

$$S_0 - S = s_1 \int_0^T \Delta l(x, t) \left( \int_t^T n_i(x, z) dz - \int_0^{T-t} n(x, z) dz \right) dt - s_2 \int_0^T \Delta l(x, t) dt > 0. \quad (11)$$

Для определения конкретных условий эффективности капремонта необходимо знать зависимости  $n(x, t)$  и  $\Delta l(x, t)$  в явном виде.

### 3. Анализ частных случаев для решения практических задач

После получения результатов внутритрубной диагностики имеется последовательность участков с различным распределением коррозионных дефектов по глубине  $m(x, y, t)$  и, следовательно, с различным распределением  $n(x, t)$ . На практике актуальны следующие вопросы и решение связанных с ними задач:

1. Капитальный ремонт каких участков эффективен на данный момент эксплуатации?

2. Какова наиболее эффективная периодичность капремонта?

Для ответа на эти вопросы рассмотрим частные случаи.

### 3.1. Однократный капремонт участков

Пусть по данным внутритрубной диагностики на данном участке длиной  $\Delta l$  на данный момент времени  $t$  определено распределение потенциально опасных (с глубиной равной или более критической) коррозионных дефектов, равное  $n(t)$ . Оценим эффективность капремонта всего участка на данный момент. В соответствии с (10) стоимость капремонта и выборочного устранения всех опасных потерь металла за срок эксплуатации  $T$  лет определяется выражением:

$$S = \Delta l (s_1 \int_0^T (n(t) - \int_t^T n(z) dz + \int_0^{T-t} n(z) dz) dt + s_2). \quad (12)$$

При  $n(t) = kt$

$$S = \Delta l (s_1 \frac{k}{2} (T^2 + 2t^2 - 2Tt) + s_2), \quad (13)$$

а эффективность капремонта оценивается в соответствии с (11)

$$S_0 - S = \Delta l (s_1 \frac{k}{2} (2Tt - 2t^2) - s_2) > 0,$$

откуда время, соответствующее остаточному сроку службы

$$(T - t) = \frac{s_2}{tks_1}. \quad (14)$$

При известных значениях  $s_2$ ,  $s_1$ ,  $t$ ,  $k$  капремонт участка эффективен только при остаточном сроке службы не менее, чем это определено выражением (14). Значения  $T - t$  при  $s_2 = 100s_1$  в зависимости от  $k$  и  $t$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

$t$ , лет	$k = 0,01$	$k = 0,05$	$k = 0,1$	$k = 0,2$	$k = 0,5$	$k = 1$
10	1000	200	100	50	20	10
15	667	133	67	33	13	6,7
20	500	100	50	25	10	5
25	400	80	40	20	8	4
30	333	67	33	17	6,7	3,3
35	286	57	29	14	5,7	2,8
40	250	50	25	12,5	5	2,5

### 3.2. Периодический капремонт

Пусть участок длиной  $\Delta l$  с распределением потенциально опасных потерь металла  $n(t) = kt$  периодически через  $\Delta t$  лет ремонтируется заменой трубы. Если  $T$  – срок службы нефтепровода;  $j$  – количество ремонтов, то  $\Delta t = \frac{T}{j+1}$ , а суммар-

ная стоимость всех ремонтов

$$S = \Delta l j (s_1 \int_0^{\Delta t} kt dt + s_2) = \Delta l j s_1 k \frac{T^2}{2(j+1)^2} + \Delta l j s_2. \quad (15)$$

Суммарная стоимость устранения дефектов без капремонтов

$$S_0 = \Delta l s_1 k \frac{T^2}{2}. \quad (16)$$

Эффективность капремонта оценивается неравенством:

$$s_1 k \frac{T^2}{2} - j s_1 k \frac{T^2}{2(j+1)^2} - j s_2 > 0. \quad (17)$$

Это неравенство имеет множество решений  $j$  при одних и тех же значениях параметров  $k$ ,  $T$ ,  $s_1$  и  $s_2$ . Из этого множества надо выбрать те, при которых суммарная стоимость ремонта отдельного участка минимальна, т.е. выполняется следующее условие:

$$j s_1 k \frac{T^2}{2(j+1)^2} + j s_2 = \min.$$

Минимизируя это выражение, а также учитывая выполнение неравенства (17), получим значения количества капремонтов  $j$  при различных  $k$ ,  $T$ ,  $s_1$  и  $s_2$ . В следующей таблице приведено оптимальное количество ремонтов при  $s_2 = 100s_1$  в зависимости от  $k$  и  $T$  [3].

Таблица 2

$T$ , лет	$k = 0,1$	$k = 0,2$	$k = 0,5$	$k = 0,8$	$k = 1,0$	$k = 1,2$
30	0	0	1	1	1	1
40	0	1	1	1	1	1
50	0	1	1	1	1	1
60	1	1	1	1	1	1
70	1	1	1	1	1	1-3
80	1	1	1	1	1-3	4
90	1	1	1	3	4	5
100	1	1	1	4	5	6

### Выводы

Рассмотрены основные виды ремонта нефтепроводов. На основании статистической обработки результатов неразрушающего контроля, опыта эксплуатации нефтепроводов и методик расчета остаточного ресурса безопасной эксплуатации трубопроводов была выполнена оценка эффективности капитального ремонта по данным диагностического контроля, в которой для каждого дефекта определены сроки и методы ремонта таким образом, чтобы суммарные затраты на ремонт на весь предстоящий срок службы нефтепровода были минимальными.

### Литература

1. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.Г. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. 250 с.
2. Зайнуллин Р.С.; Гумеров А.Г. и др. Расчеты ресурса оборудования и трубопроводов с учетом механохимической коррозии и неоднородности. М.: Недра, 2004. 195 с.
3. Зайнуллин Р.С. Ресурс трубопроводных систем. Уфа: Изд-во «БЭСТС», 2005. 836 с.
4. Зайнуллин Р.С., Морозов Е.М., Александров А.А. Критерии безопасного разрушения элементов трубопроводных систем с трещинами. М: Наука, 2005. 316 с.
5. Харисов Р.А., Кантемиров И.Ф. Оценка фактической степени напряженности элементов трубопроводных систем при эксплуатации // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 3 (85). С. 84 - 90.

## PERFORMANCE EVALUATION OF THE OIL PIPELINE REPAIR BY DIAGNOSTIC DATA

R.A. Kharisov, I.F. Kantemirov

*Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia*  
*e-mail: pipe-ufa@mail.ru*

I.A. Daminov

*Uralsibnefteprovod JSC, Ufa, Russia*  
*e-mail: usmn@ufa.transneft.ru*

A.V. Gerasimov

*“Safe operation of complex piping systems” LLC, Ufa, Russia*

**Abstract.** *The Russian Federation has been in operation considerable number of pipeline transportation. At present, the level of reliability adversely affects a number of factors: the difficult economic conditions, lack of adequate investment, and a steady increase in the proportion of objects, exhausted regulatory period, as well as more stringent operating conditions. Under these conditions, accident prevention and environmental protection are possible only with timely conduct of technical diagnostics. This determines the relevance of the newest methods of nondestructive testing, providing faster diagnosis, to obtain reliable estimates of technical condition and residual life prediction informed of safe operation. It is based on the results of diagnostic monitoring set amount of capital or selective repairs.*

**Keywords:** *selective repair, planning, evaluation, performance, diagnostics, oil pipeline efficiency*

### References

1. Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.G. Raschety detalei mashin i konstruktsii na prochnost' i dolgovechnost' (Strength and durability design of machine elements and structures). Moscow, Mashinostroenie, 1985. 250 p.
2. Zainullin R.S., Gumerov A.G. et al. Raschety resursa oborudovaniya i truboprovodov s uchetom mekhanokhimicheskoi korrozii i neodnorodnosti (Calculations of the service life of equipment and pipelines considering for mechanochemical corrosion and heterogeneity). Moscow, Nedra, 2004. 195 p.
3. Zainullin R.S. Resurs truboprovodnykh sistem (Service life of the pipeline systems). Ufa: BESTS, 2005. 836 p.
4. Zainullin R.S., Morozov E.M., Aleksandrov A.A. Kriterii bezopasnogo razrusheniya elementov truboprovodnykh sistem s treshchinami (Safe destruction criteria for pipeline elements with cracks). Moscow, Nauka, 2005. 316 p.
5. Kharisov R.A., Kantemirov I.F. Otsenka fakticheskoi stepeni napryazhennosti elementov truboprovodnykh sistem pri ekspluatatsii (Assessment of actual stress degree of pipeline system,s elements during operation), *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefte-produktov - Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2011, Issue 3 (85), pp. 84 - 90.