

## Технико-экономическое обоснование выбора варианта эксплуатации теплоизолированных водоводов при надземной прокладке в условиях Крайнего Севера

Мизонов В. Е., Елин Н. Н., доктора техн. наук

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный технический университет»

Елина Т. Н., канд. экон. наук, Мыльников В. А., канд. техн. наук

ФГБОУ ВПО «Норильский индустриальный институт»

Представлена методика оценки экономической эффективности эксплуатации трубопроводного транспорта в условиях Крайнего Севера, включающая в себя определение оптимальных сроков реконструкции (замены) трубопровода и выбор наиболее эффективного варианта реконструкции с целью минимизации среднегодовых и совокупных приведенных затрат. Данный подход позволяет проводить подготовку экономически обоснованных планов реконструкции и капитального ремонта трубопроводов.

**Ключевые слова:** эксплуатация трубопроводного транспорта, оценка экономической эффективности, технико-экономическое обоснование, реконструкция, инвестиции.

Трубопроводы наружной прокладки для перекачки воды или других жидкостей в зимний период на Крайнем Севере эксплуатируются в напряженных термических условиях. При аварийном или плановом прекращении подачи жидкости возможно промерзание тепловой изоляции трубопровода, а затем — замерзание находящейся в нем неподвижной воды. В последнее время для повышения энергетической эффективности теплоизолированных трубопроводов стали применять их электрообогрев, который позволяет в ряде случаев минимизировать негативные последствия процессов, сопровождающих аварийные ситуации.

В [1–3] рассмотрена нелинейная ячеечная математическая модель сложного процесса теплопроводности в составной кольцевой области с учетом фазовых переходов, изменения теплофизических свойств и действия внутренних источников теплоты, на основе которой предложено описание переходного теплового процесса в сечении трубопровода с подвижной и неподвижной жидкостью, учитывающее кинетику промерзания изоляции и самой жидкости. Выявлено влияние конструктивных и режимных факторов обогревающих элементов на кинетику этого процесса. Результаты данных исследований позволяют перейти к обоснованному выбору варианта эксплуатации трубопроводной системы на основе технико-экономических показателей.

В качестве критерия оптимальности приемлем средние годовые приведенные затраты  $Z_t$  [4], позволяющие сравнивать варианты с разными сроками службы трубопроводов. Пока-

затель  $Z_t$  — это ежегодные затраты, которые могут быть необходимы вплоть до замены трубопровода, причем в сумме они должны быть эквивалентны всем затратам до его замены с учетом капитальных вложений. Можно определить  $Z_t$  как средние ежегодные затраты на эксплуатацию отдельного трубопровода от даты ввода в строй до даты предполагаемой замены с учетом расходов на его строительство или реконструкцию.

Технико-экономический ресурс (ТЭО-ресурс) трубопровода определяется временем достижения минимального значения  $Z_t$ . Тогда целевая функция оптимизации эксплуатационных издержек

$$F_{\text{ТЭО}}(t) = \min(Z_t). \quad (1)$$

Для расчета среднегодовых приведенных затрат за рассматриваемый период (год)  $t$  предлагается использовать следующие соотношения:

$$Z_t = Z_{t \text{ кап}} + Z_{t \text{ авар}} + Z_{t \text{ экспл}}; \quad (2)$$

$$Z_{t \text{ кап}} = \frac{K}{t \sum_{i=1}^t \left( \frac{1}{i^2} \right)}; \quad (3)$$

$$Z_{t \text{ авар}} = C_{\text{авар}} a_t; \quad (4)$$

$$a_t = a'_t L; \quad (5)$$

$$C_{\text{авар}} = z_{\text{ликв. авар}} + C_{\text{жидк}} b_{\text{жидк}}, \quad (6)$$

где  $Z_{t \text{ кап}}$  — среднегодовые приведенные капитальные вложения (аналог ускоренной амортизации).

Таблица 1

$t$ , тыс. руб.	$Z_t^{\text{кап}}$ , тыс. руб.	$a'_t$ , шт/(год · км)	$a_t$ , шт.	$Z_t^{\text{авар}}$ , тыс. руб.	$Z_t^{\text{экспл}}$ , тыс. руб.	$Z_t$ , тыс. руб.	Отклонение $Z_t$ от $\min Z_t$
1 (2006)	26 446	0,00	0,00	0	5294	31 740	25 131
2 (2007)	6611	0,00	0,04	11	5294	11 917	5308
3 (2008)	2938	0,01	0,13	34	5294	8267	1658
4 (2009)	1653	0,02	0,23	61	5444	7158	549
5 (2010)	1058	0,03	0,38	99	5494	6651	43
6 (2011)	735	0,05	0,79	206	5694	6635	26
7 (2012)	540	0,07	1,05	275	5794	6609	0
8 (2013)	413	0,10	1,46	382	5994	6789	180
9 (2014)	326	0,19	2,77	725	6294	7346	737
10 (2015)	264	0,25	3,65	954	6494	7713	1104
11 (2016)	219	0,32	4,67	1221	6994	8434	1825
12 (2017)	184	0,40	5,84	1526	7794	9504	2896
13 (2018)	156	0,48	7,01	1832	7994	9983	3374
14 (2019)	135	0,50	7,30	1908	8494	10 537	3928
15 (2020)	118	0,60	8,76	2290	8794	11 202	4593
16 (2021)	103	0,68	9,93	2595	9794	12 493	5884
17 (2022)	92	0,80	11,68	3053	10 294	13 439	6830
18 (2023)	82	0,85	12,41	3244	11 294	14 620	8011
19 (2024)	73	0,98	14,31	3740	12 294	16 107	9499
20 (2025)	66	1,20	17,52	4579	13 294	17 940	11331
Итого	42 211	—	109,94	28 735	154 137	225 084	—

тизации) за период (год)  $t$ , руб.;  $Z_t^{\text{авар}}$  — среднегодовые приведенные затраты вследствие аварий на трубопроводе за период (год)  $t$ , руб.;  $Z_t^{\text{экспл}}$  — среднегодовые приведенные затраты на эксплуатацию трубопровода за период (год)  $t$ , руб.;  $K$  — капитальные вложения в строительство нового трубопровода либо в реконструкцию, руб.;  $t$  — период (год) расчета;  $T$  — горизонт расчета, год;  $C_{\text{авар}}$  — средние расходы вследствие одной аварии, руб.;  $a_t$  — количество отказов в  $t$ -й год от начала эксплуатации, шт.;  $a'_t$  — удельная аварийность на трубопроводе, шт/(год · км);  $L$  — длина трубопровода, км;  $z_{\text{ликв.авар}}$  — средние затраты на ликвидацию одной аварии, руб.;  $C_{\text{жидк}}$  — среднегодовая стоимость 1 м<sup>3</sup> разлитой жидко-

сти, руб.;  $b_{\text{жидк}}$  — среднее количество разлитой жидкости за одну аварию, м<sup>3</sup>.

Расчет  $Z_t$  позволяет определить текущий уровень среднегодовых затрат на трубопровод и решить, стоит ли проводить его реконструкцию или можно продолжать эксплуатацию в данном режиме. Трубопровод выработал свой ТЭО-ресурс, если график функции  $Z_t$  прошел точку минимума, и его дальнейшая эксплуатация приносит предприятию ежегодные убытки  $\Delta Z_t$ , определяемые по формуле

$$\Delta Z_t = Z_t - F_{\text{ТЭО}}(Z_t). \quad (7)$$

При достижении периода выработки ТЭО-ресурса экономически целесообразна реализа-

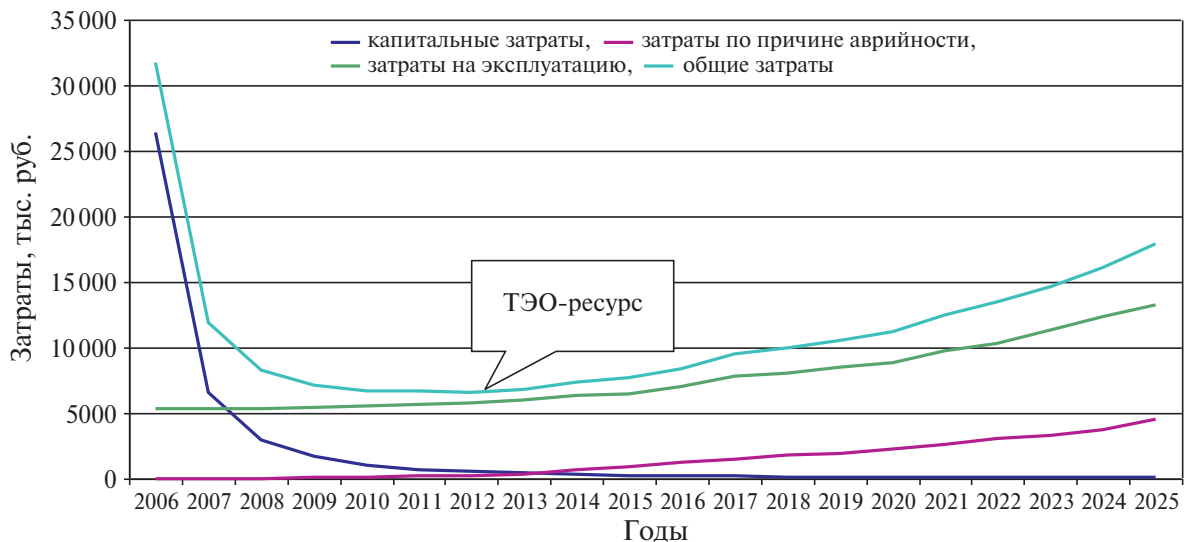


Рис. 1. Графическое представление расчета ТЭО-ресурса трубопровода

ция проекта по снижению затрат на эксплуатацию трубопровода. В этом случае первоочередной становится задача выбора одного наиболее экономически эффективного варианта  $i$  из нескольких существующих. Экономическая эффективность будет определяться как целевая функция минимума совокупных приведенных затрат  $Z_i$  на эксплуатацию трубопровода за установленный (желаемый) горизонт расчета  $T$  при реализации варианта  $i$ :

$$F = \min (Z_i); \quad (8)$$

$$Z_i = \sum_{t=1}^T Z_t^i, \quad (9)$$

где  $Z_t^i$  — средние приведенные затраты на эксплуатацию трубопровода за период (год)  $t$  при реализации варианта  $i$ .

В качестве примера рассмотрим водовод “Норильск — Алыкель” протяженностью 14 600 м, диаметром 219 × 8 мм со слоем тепловой изоляции из пенополиуретана теплопроводностью 0,029 Вт/(м · °С), толщиной 40 мм, по которому подается 30,5 т/ч воды. На выходе вода подогревается до 24 °С. В 2013 г. рассматриваемый трубопровод был экономически убыточным для предприятия ОАО “Норильско-Таймырская энергетическая компания”. Себестоимость поставляемой им воды в аэропорт “Алыкель” — 1868 тыс. руб./год, выручка от реализации — 1584 тыс. руб./год, т.е. убыток от реализации воды составил 284 тыс. руб./год.

В табл. 1 приведены результаты расчета  $Z_t$ , тыс. руб., его отклонения от ТЭО-ресурса трубопровода.

Капитальные затраты в ценах 2012 г. на строительство 1 км трубопровода составляют 2891 тыс. руб., следовательно, затраты на строительство всего трубопровода длиной 14 600 м приняты равными 42 211 тыс. руб. Горизонт расчета  $T$  принят исходя из планируемого срока эксплуатации трубопровода 20 лет. По данным компании,  $Z_{\text{ликв.авар}} = 261$  тыс. руб.;  $C_{\text{жидк}} = 7,32$  руб.;  $b_{\text{жидк}} = 18,35$  м<sup>3</sup>.

Эксплуатационные затраты ( $Z_{t \text{ экпл}}$ ) включают в себя затраты на прокачку воды (электроэнергия для насосов), на ее подогрев у источника и потребителя (электроэнергия для котлов), затраты на планово-предупредительные ремонты и накладные расходы.

В результате расчета определен ТЭО-ресурс трубопровода на седьмом году его эксплуатации, т.е. в 2012 г., когда среднегодовые приведенные затраты были минимальными. Графически результаты расчета отражены на рис. 1.

Рассмотрим следующие варианты дальнейшей эксплуатации трубопровода “Норильск — Алыкель” [3, 4]: эксплуатировать трубопровод без каких-либо изменений; провести капитальный ремонт с заменой трубы; улучшить теплоизоляционный материал трубопровода; внедрить систему мониторинга и гибкого управления подогревом воды по длине трубопровода. Следует отметить, что все они являются вариантами с неопределенными сроками службы — эксплуатация наземных трубопроводов в условиях агрессивной внешней среды характеризуется неравномерностью коррозии во времени и по длине трубопровода, теоретически она может продолжаться

Таблица 2

$t$	$Z_t$ , тыс. руб.			
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
1 (2014)	7346	28 845	18 893	10 550
2 (2015)	7713	11 305	9535	7165
3 (2016)	8434	8078	7861	6635
4 (2017)	9505	7107	7310	6471
5 (2018)	9983	6659	7078	6494
6 (2019)	10 537	6660	7051	6526
7 (2020)	11 202	6656	6996	6607
8 (2021)	12 493	6841	7074	6685
9 (2022)	13 439	7258	7148	6746
10 (2023)	14 620	7632	7433	7012
11 (2024)	16 107	8298	7526	7118
12 (2025)	17 940	9233	8014	7465
13 (2026)	20 066	9614	8959	8036
14 (2027)	23 427	10 271	10 383	9200
15 (2028)	26 338	10 937	11 309	9749
Итого за период $T$	209 147,56	145 393	132 570	112 457

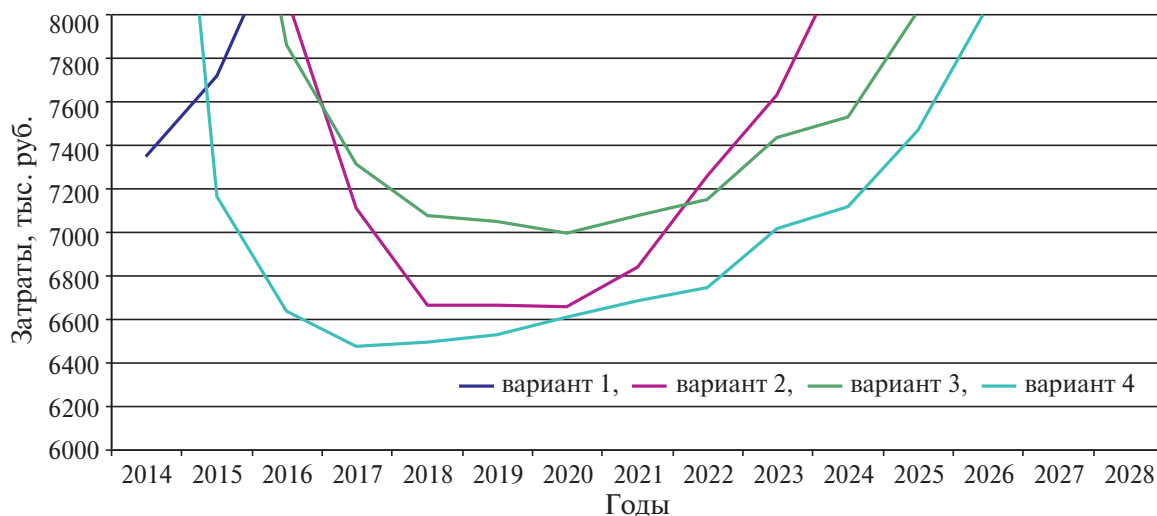


Рис. 2. Динамика средних приведенных затрат рассматриваемых вариантов

очень долго за счет текущих ремонтов и замены выходящих из строя участков.

Проведем анализ экономической эффективности указанных вариантов и выберем наилучший из них с точки зрения наименьших совокупных приведенных затрат. Гори-

зонт расчета  $T$  выберем равным 15 годам, начиная с 2014 г., т. е. с 9-го года эксплуатации, и до 2028 г. Результаты расчета  $Z_t$  для каждого варианта представлены в табл. 2, из которой видно, что наименьшие совокупные приведенные затраты за период  $T$  достигают-

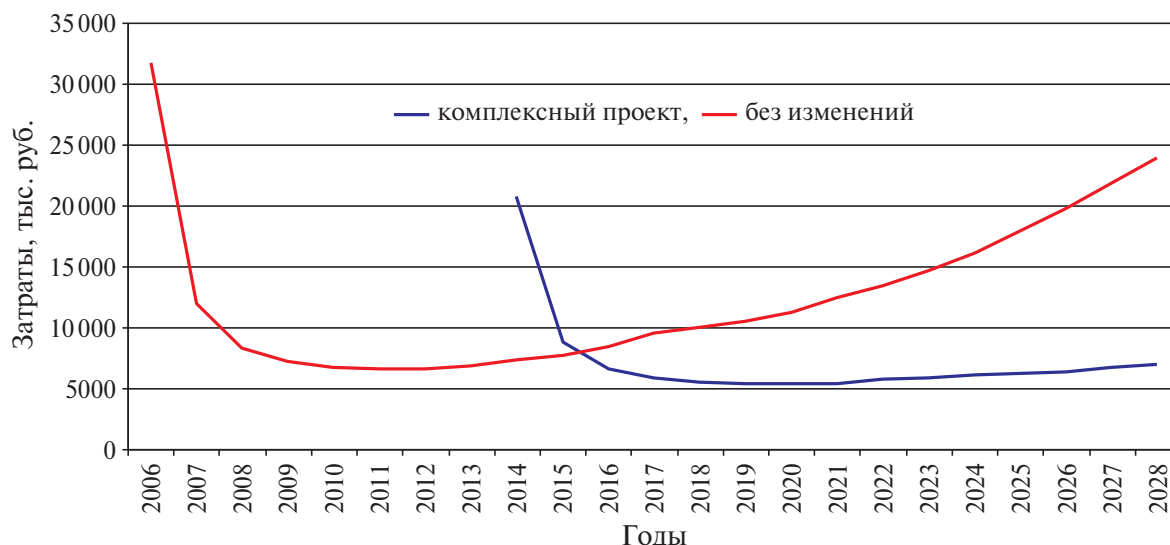


Рис. 3. Динамика средних приведенных затрат варианта 1 и комплексного варианта

ся при реализации варианта 4 эксплуатации трубопровода, но он имеет один из самых ранних сроков достижения ТЭО-ресурса (рис. 2). Это объясняется значительной долей износа самого трубопровода и его теплоизоляции за текущий период. Осуществление данного проекта в совокупности с другими вариантами, например, заменой теплоизоляции (вариант 3), несомненно, обеспечит лучший ТЭО-ресурс.

Совокупные приведенные затраты для комплексного варианта (3 + 4) эксплуатации трубопровода за период 2014 – 2028 гг. составят 107 485 тыс. руб. При сравнении комплексного варианта с вариантом 1 (эксплуатация без изменений) разница в средних приведенных затратах в 2028 г. будет равна 16 924 тыс. руб., а ТЭО-ресурс будет достигнут в 2020 г. (рис. 3).

Предлагаемая методика позволяет проводить подготовку экономически обоснованных планов реконструкции и капитального ремонта трубопроводов. Расчет всех заявленных в планы реконструкции и капитального ремонта трубопроводов необходимо выполнять с учетом данных о ретроспективной аварий-

ности. Анализ расчетных данных дает возможность ранжировать проекты реконструкции и выбирать те трубопроводы, продолжение эксплуатации которых экономически невыгодно предприятию.

#### Список литературы

1. Попельшко А. В., Елин Н. Н., Мизонов В. Е. Моделирование переходных тепловых процессов в трубопроводе при аварийной остановке прокачки жидкости. — Промышленная энергетика, 2013, № 9.
2. Мизонов В. Е., Елин Н. Н., Попельшко А. В. Ячееная модель теплового состояния поперечного сечения теплоизолированного трубопровода. — Изв. вузов. Химия и химическая технология, 2013, т. 55, вып. 4.
3. Моделирование теплового состояния поперечного сечения трубопровода при промерзании теплоизоляции / В. Е. Мизонов, Н. Н. Елин, А. В. Попельшко, В. А. Мильников. — Вестник ИГЭУ, 2013, № 2.
4. Экономический подход к организации мероприятий по повышению надежности промысловых трубопроводов ОАО «ЮКОС» / А. П. Медведев, А. Т. Фаритов, А. И. Топоровский и др. — Вестник ЮКОС, 2003, № 8.

yelinnn@mail.ru