

УДК 658

МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНЫХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРООБОГРЕВА¹М.А. Булатенко, ²М.А. Федин, ²Д.В. Михеев¹ ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, email: mabulatenko@gmail.com² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Аннотация. Рассматривается сравнительный анализ капитальных и эксплуатационных затрат на индукционно-резистивные и традиционные паровые системы обогрева нефтяных трубопроводов в условиях северного климата. Разработана методика технико-экономической оценки внедрения индукционно-резистивных систем электрообогрева на основе совокупной стоимости владения технической установки. Предлагаемый подход к оценке учитывает затраты на оборудование, монтаж, доставку, эксплуатацию и возможные непредвиденные расходы. Расчеты показали, что внедрение индукционно-резистивной системы нагрева снижает годовые эксплуатационные затраты на 65% и имеет более низкие капитальные затраты по сравнению с паровым обогревом. Кроме того, электрообогрев обладает экологической безопасностью и возможностью точного автоматического управления, что делает его перспективной альтернативой физически и морально устаревшим паровым системам. Применение разработанной методики позволит предприятиям принимать обоснованные управленческие и инвестиционные решения по повышению эффективности трубопроводного транспорта.

Ключевые слова: индукционно-резистивная система нагрева, совокупная стоимость владения, энергоэффективность, промышленное оборудование, капитальные затраты, эксплуатационные затраты, скин-система.

METHODOLOGY OF TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF INDUCTION-RESISTIVE INDUSTRIAL ELECTRIC HEATING SYSTEMS¹M.A. Bulatenko, ²M.A. Fedin, ²D.V. Mikheev¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, email: mabulatenko@gmail.com² National Research University «MPEI», Moscow

Abstract. The paper presents a comparative analysis of capital and operating costs for induction-resistive and traditional steam heating systems for oil pipelines in northern climates. A methodology has been developed for the technical and economic assessment of the introduction of induction-resistive electric heating systems based on the total cost of ownership of a technical installation. The proposed assessment approach takes into account the costs of equipment, installation, delivery, operation and possible unforeseen expenses. Calculations have shown that the introduction of an induction-resistive heating system reduces annual operating costs by 65% and has lower capital costs compared to steam heating. In addition, electric heating has environmental safety and the possibility of precise automatic control, which makes it a promising alternative to physically and morally outdated steam systems. The application of the developed methodology will allow enterprises to make informed management and investment decisions to improve the efficiency of pipeline transport.

Keywords: induction-resistive heating system, total cost of ownership, energy efficiency, industrial equipment, capital costs, operating costs, skin-electric heating system.

Дата поступления статьи в редакцию: 18.11.2025

Дата принятия статьи в печать: 30.12.2025

Введение

Обогрев трубопроводов в нефтегазовой отрасли играет важную роль для обеспечения надежности транспортировки нефти, предотвращения образования парафина и кристаллизации воды. В России большая часть нефтяных и газовых месторождений находятся в условиях северного климата, поэтому данный вопрос наиболее актуален [1].

Еще с начала XX века основным способом обогрева и поддержания температуры в нефтяных трубопроводах являлся обогрев паром. При необходимости обеспечения более высоких температур, также применялся метод жидкостного обогрева на минеральном масле. После 1945 года начала эффективно развиваться нефтяная промышленность и парового обогрева стало недостаточно, поэтому по большей части применялся обогрев маслами. Такие методы имели низкую энергетическую эффективность и не имели возможности регулировки подачи тепла [2].

Обогрев трубопроводов на основе электронагревателей, который появился еще в начале XX века, сначала не был распространен, так как из-за высокой температуры оболочки мощных систем часто возникало возгорание, что приводило к колоссальным убыткам. К 1960-м годам инженерам удалось создать более надежные системы обогрева, которые по своим параметрам сильно превосходили более ранние способы обогрева паром и маслом [3].

В индукционно-резистивной системе (ИРСН) нагрев происходит под действием переменного магнитного поля [3]. Индукционно-резистивная система подключается к общей энергосети и имеет автоматическую систему управления и может быть интегрирована в систему управления верхнего уровня [4]. Нагревательный элемент прокладывается снаружи трубопровода, что делает систему электрически безопасной и позволяет использовать ее даже во взрывоопасных зонах. Сама ИРСН является питающей линией, благодаря чему обеспечивает поддержание температуры на магистральных трубопроводах протяженностью до 30 км [5].

В связи с постепенным устареванием традиционных паровых систем обогрева, ИРСН являются перспективным направлением, обладающим высоким потенциалом к промышленному внедрению [6]. Однако, для принятия управленческих и инвестиционных решений предприятиям необходима обоснованная технико-экономическая информация о преимуществах новой технологии.

Среди потенциальных заказчиков имеется низкая осведомленность об индукционно-резистивных системах нагрева, отсутствуют доступные расчеты эффективности и примеры успешных пилотных проектов, что требует создания наглядного механизма оценки эффективности внедрения для повышения доверия и рыночной привлекательности технологии.

Так как на данный момент ИРСН не имеет широкого использования, несмотря на значительные преимущества, существует недостаток комплексных исследований, которые докажут эффективность с точки зрения технико-экономических показателей. Для того, чтобы заменить уже существующие способы обогрева трубопроводов в промышленности на скин-систему, необходимо учитывать не только энергозатраты, но и инвестиционные затраты на внедрение системы, срок ее окупаемости, влияние на производительность труда, а также экологическое преимущество.

Цель исследования

На данный момент имеется научное противоречие: с одной стороны, существует актуальная потребность в прогрессивных технологиях промышленного обогрева на примере индукционно-резистивных систем нагрева, которые снижают эксплуатационные и капитальные затраты, повышают надежность и безопасность функционирования промышленных объектов в холодных климатических условиях. С другой стороны, наблюдается недостаток осведомленности среди потенциальных заказчиков из промышленности, отсутствуют в открытом доступе расчетные данные по экономической целесообразности внедрения таких систем, не распространен опыт положительных пилотных проектов. Вышеуказанное подчеркивает необходимость создания наглядного механизма, который позволит продемонстрировать целесообразность или же ее отсутствие для внедрения индукционно-резистивных систем нагрева, обеспечивая информированное принятие решения и повышая их рыночную привлекательность.

Целью данного исследования является разработка методики технико-экономической оценки внедрения индукционно-резистивных систем промышленного электрообогрева на основе сравнения с установкой и обслуживанием паровых систем обогрева.

Материал и методы исследования

Методологической основой исследования является комплексный подход, который позволит интегрировать технические [7-9] и экономические показатели для оценки эффективности индукционно-резистивных систем нагрева.

Для сравнения затрат на системы парового обогрева и индукционно-резистивные системы электрообогрева принята сопоставимая методология расчета и исходные данные [10].

Для расчета были приняты следующие исходные данные (табл. 1).

Исходные данные для расчета

№	Параметр и обозначение	Значение
1	Местонахождение трубопровода	Ямало-Ненецкий АО
2	Материал трубопровода	Углеродистая сталь высокой прочности
3	Поддерживаемая температура нефти, T_n	110 °С
4	Температура грунта, $T_{окр}$	23,5 °С
5	Длина трубопровода, L	62,7 км
6	Наружный диаметр трубопровода, $D_{нар}$	0,2286 м
7	Внутренний диаметр трубопровода, $d_{вн}$	0,1944 м
8	Толщина изоляции ППУ, $h_{ППУ}$	0,1 м
9	Общий наружный диаметр трубопровода с изоляцией ППУ, $D_{общ}$	0,4286 м
10	Теплопроводность изоляции ППУ, $\lambda_{ППУ}$	0,025 Вт/(м·К)
11	Теплопроводность трубы, $\lambda_{тр}$	50 Вт/(м·К)
12	Коэффициент конвективной теплопередачи, α	15 Вт/(м ² ·К)
13	Коэффициент запаса, $k_{зап}$	1,2
14	КПД трансформатора, $\eta_{тр-р}$	97%

Для расчета стоимости компонентов, материалов и оборудования использовались данные, взятые из открытых источников сети Интернет. Все используемые цены были актуальны на июнь-август 2025 года и отражают среднерыночные значения.

Результаты исследования

Для того, чтобы рассчитать суммарные затраты на производство индукционно-резистивной системы нагрева, необходимо рассчитать мощность ИРСН, а также суммарное потребление электроэнергии. Для начала нужно рассчитать термическое сопротивление стенки трубопровода, термическое сопротивление изоляции, термическое сопротивление конвективной теплоотдачи поверхности трубопровода в окружающую среду.

Этап 1. Расчет сопротивлений

Рассчитаем все термические сопротивления (трубопровода, грунта, конвективной теплоотдачи поверхности трубопровода в окружающую среду):

Термическое сопротивление стенки трубопровода на 1 м рассчитывается по формуле 1:

$$R_{тр} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{тр}} \cdot \ln \left(\frac{D_{нар}}{d_{вн}} \right), \quad (1)$$

$$R_{тр} = \frac{1}{2\pi \cdot 50} \cdot \ln \left(\frac{0,2286}{0,1944} \right) = 0,00052 \text{ (м} \cdot \text{К) / Вт}.$$

Термическое сопротивление изоляции на 1 м рассчитывается по формуле 2:

$$R_{ППУ} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{ППУ}} \cdot \ln \left(\frac{D_{общ}}{D_{нар}} \right), \quad (2)$$

$$R_{ППУ} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,025} \cdot \ln \left(\frac{0,4286}{0,2286} \right) = 4,001 \text{ (м} \cdot \text{К) / Вт}.$$

Термическое сопротивление конвективной теплоотдачи поверхности трубопровода в окружающую среду (в грунт) на 1 м рассчитаем по формуле 3:

$$R_{конв} = \frac{1}{\pi \cdot \alpha \cdot \frac{D_{общ}}{1000}}, \quad (3)$$

$$R_{\text{Конв}} = \frac{1}{\pi \cdot 15 \cdot \frac{0,4286}{1000}} = 49,51 \text{ (м} \cdot \text{К)} / \text{Вт.}$$

Этап 2. Расчет мощности ИРСН и суммарного потребления электроэнергии

Для того, чтобы рассчитать мощность ИРСН, для начала необходимо произвести расчет тепловых потерь в трубопроводе, которые определяются по формуле 4:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \frac{(T_{\text{н}} - T_{\text{окр}})}{R_{\text{тр}} + R_{\text{ППУ}} + R_{\text{Конв}}}, \quad (4)$$

$$\Delta P_{\text{тр}} = \frac{(110 - 23,5)}{0,00052 + 4,001 + 49,51} = 1,162 \text{ Вт/м.}$$

Теперь приступим к расчету мощности ИРСН, которая определяется, как потери в трубопроводе, умноженные на длину самого трубопровода и на коэффициент запаса (формула 5):

$$P_{\text{ИРСН}} = \Delta P_{\text{тр}} \cdot L \cdot k_{\text{зап}}, \quad (5)$$

$$P_{\text{ИРСН}} = 1,162 \cdot 62,7 \cdot 10^3 \cdot 1,2 = 87428,88 \text{ Вт} = 87,43 \text{ кВт.}$$

Далее рассчитаем потери в симметрирующем трансформаторе (формула 6, примем КПД трансформатора $\eta_{\text{тр-р}} = 0,97$), чтобы потом найти суммарное потребление электроэнергии:

$$\Delta P_{\text{тр-р}} = P_{\text{ИРСН}} \cdot (1 - \eta_{\text{тр-р}}), \quad (6)$$

$$\Delta P_{\text{тр-р}} = 87,43 \cdot (1 - 0,97) = 2,623 \text{ кВт.}$$

Переходим к расчету суммарного потребления электроэнергии (формула 7):

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ИРСН}} + \Delta P_{\text{тр-р}}, \quad (7)$$

$$P_{\Sigma} = 87,43 + 2,623 = 90,053 \text{ кВт.}$$

Этап 3. Модель расчета стоимости приобретения ИРСН

Для расчета стоимости приобретения ИРСН необходимо учесть затраты на покупку всего основного оборудования, дополнительных компонентов и транспортные расходы на доставку оборудования до места установки.

Стоимость приобретения ИРСН складывается из следующих составляющих:

1. Стоимость оборудования (Ц_о), включающая все основные и дополнительные компоненты индукционно-резистивной системы нагрева и необходимые аксессуары, определяется спецификацией модели ИРСН, её мощностью и другими техническими характеристиками.

Рассмотрим все компоненты ИРСН [3]:

1. Блочно-модульная комплектная трансформаторная подстанция заводской готовности.
2. Индукционно-резистивный проводник (ИРП).
3. Индукционно-резистивный нагреватель (ИРН).
4. Датчики температуры.
5. Компоненты для монтажа и крепления:
6. Индукционно-резистивная питающая коробка (ИРПК).
7. Индукционно-резистивные соединительные коробки (ИРСК).
8. Индукционно-резистивная концевая коробка (ИРКК).
9. Лента крепежная стальная.
10. Термопаста.
11. ИРН втулка соединительная.
12. Стальной пруток.
13. Опоры.

14. Силовые и контрольные кабели.
15. Запасные части, инструменты и принадлежности.

2. Затраты на доставку (C_d) включают в себя расходы на транспортировку системы к месту монтажа и эксплуатации. Стоимость может варьироваться в зависимости от расстояния и выбранного метода доставки. Также стоит учесть возможные дополнительные расходы, например, на страхование груза, которое обязательно при перевозке дорогого оборудования.

Этап 4. Расчет CAPEX – расчету стоимости всех составляющих

Индукционно-резистивные соединительные коробки (ИРСК) устанавливаются примерно каждые 70 м. Стоимость одной соединительной коробки составляет 9 597 руб. Так как длина трубопровода составляет 62 700 м, то необходимо использовать 896 коробок ИРСК.

Стоимость ИРСК составляет:

$$S_{\text{ИРСК}} = 9597 \cdot 896 = 8\,598\,912 \text{ руб.}$$

Индукционно-резистивные концевые коробки (ИРКК) устанавливаются в конце системы обогрева. Стоимость одной концевой коробки составляет 19 997 руб. Так как ИРСН способна обогреть трубопровод протяженностью 30 км (по 15 км в каждую сторону), то необходимо будет установить две системы обогрева для заданного трубопровода. Следовательно, нужно использовать 4 ИРКК (по одной концевой коробке на каждое плечо обогрева для двух систем). Стоимость ИРКК составит:

$$S_{\text{ИРКК}} = 19997 \cdot 4 = 79\,988 \text{ руб.}$$

Стоимость ферромагнитной бесшовной трубы 32×3 мм составляет 711,23 руб./м. Так как длина трубопровода 62 700 м, то стоимость труб (ИРН) составит:

$$S_{\text{ИРН}} = 711,23 \cdot 62\,700 = 44\,594\,121 \text{ руб.}$$

Индукционно-резистивные питающие коробки (ИРПК) устанавливаются в начале системы обогрева. Стоимость одной питающей коробки составляет 53 960 руб. По аналогии с расчетом ИРКК, необходимо использовать 4 питающие коробки, стоимость которых составит:

$$S_{\text{ИРПК}} = 53\,960 \cdot 4 = 215\,840 \text{ руб.}$$

Термопаста закупается ведрами по 3,79 л стоимостью 11117,02 руб. / ведро. Количество необходимой термопасты вычисляется по формуле 8:

$$Q_{\text{тп}} = 2 \cdot s \cdot L = 2 \cdot 14 \cdot 10^{-6} \cdot 62\,700 = 0,1756 \text{ м}^3 = 175,56 \text{ л}, \quad (8)$$

где s – площадь нанесения термопасты; L – длина трубопровода.

Таким образом, необходимое количество ведер термопасты:

$$N_{\text{тп}} = \frac{Q_{\text{тп}}}{3,79} = \frac{175,56}{3,79} = 46,32 = 47 \text{ шт.}$$

Стоимость термопасты:

$$S_{\text{тп}} = 47 \cdot 11117,02 = 522\,499,94 \text{ руб.}$$

Втулки ТС 40 устанавливаются в начале индукционно-резистивных соединительных коробок (ИРСК), которых нужно 896, следовательно и втулок нужно столько же. Стоимость одной втулки составляет 79 руб., следовательно, стоимость всех втулок:

$$S_{\text{втулки}} = 79 \cdot 896 = 70\,784 \text{ руб.}$$

Для производства ИРСН необходимо 62 700 м индукционно-резистивного проводника (ИРП). Для расчета был взят кабель напряжением до 5 кВ, сечением 16 мм^2 , стоимость которого составляет 1200 руб./м. Тогда стоимость необходимой протяженности кабеля:

$$S_{\text{ИРП}} = 62\,700 \cdot 1\,200 = 75\,240\,000 \text{ руб.}$$

Рассмотрим комплектную трансформаторную подстанцию блочную (с корпусом «сэндвич») мощностью 250 кВ·А. Стоимость КТП составляет 60 000 000 руб.

В стоимость данной КТП не включен трансформатор. Выбираем симметрирующий трансформатор ТСТ-250 мощностью 250 кВт, стоимость которого составляет 580 000 руб. Так как необходимо установить две системы обогрева, то потребуется две КТП и два симметрирующих трансформатора. Тогда общая стоимость КТП с трансформатором составит:

$$S_{\text{КТП_общ}} = 2 \cdot (60\,000\,000 + 580\,000) = 1211\,60\,000 \text{ руб.}$$

Датчики температуры трубопровода необходимы для контроля и автоматической передачи информации о текущей температуре. Такие датчики устанавливаются в начале в конце каждого плеча обогрева. Стоимость одного датчика составляет 8 950 руб. Получается, что на всю систему необходимо 8 датчиков, стоимость которых составит:

$$S_{\text{дат_тр}} = 8 \cdot 8\,950 = 71\,600 \text{ руб.}$$

Также необходимо учесть датчики температуры окружающего воздуха, которые устанавливаются в начале плеча обогрева. Стоимость одного датчика составляет 2 548 руб. Всего потребуется 4 датчика.

$$S_{\text{дат_окр}} = 4 \cdot 2548 = 101\,92 \text{ руб.}$$

В качестве крепежной ленты планируется использовать стальные стяжки. Диаметр трубопровода с изоляцией ППУ составляет 428,6 мм, также необходимо учесть запас на присоединение ИРСН (диаметр ИРН составляет 32 мм). Выбираем стальные стяжки длиной 500 мм, стоимость которых составляет 2 086 руб. за 100 шт. Стяжки крепятся с расстоянием 1 м друг от друга. Так как длина трубопровода 62 700 м, то необходимо использовать 62 700 шт. стяжек. Тогда стоимость стяжек составит:

$$S_{\text{стяж}} = 2\,086 \cdot 627 = 1\,307\,922 \text{ руб.}$$

Далее перейдем к расчету заработной платы сотрудникам. Для производства ИРСН необходима команда из 3 инженеров-проектировщиков и 10 монтажников. Средняя заработная плата инженера-проектировщика систем электрообогрева в Москве составляет 150 000 руб. в месяц.

Для проектирования ИРСН троим инженерам потребуется в среднем 53 дня. Считая, что в одном месяце примерно 21 рабочий день, тогда стоимость одного рабочего дня составит:

$$S_{3_1} = \frac{150\,000}{21} = 7142,86 \text{ руб. /день}$$

Тогда затраты на заработную плату на троих инженеров-проектировщиков за 53 рабочих дня составят:

$$S_{3_п} = 3 \cdot 53 \cdot 7142,86 = 1\,135\,714,3 \text{ руб.}$$

Средняя заработная плата монтажника систем электрообогрева в Ямало-Ненецком АО составляет 113 257,6 руб. 10 монтажников установят ИРСН за 37 рабочих дней.

Считая, что в одном месяце примерно 21 рабочий день, тогда стоимость одного рабочего дня составит:

$$S_{3_1} = \frac{113\,257,6}{21} = 5\,393,22 \text{ руб. /день.}$$

Тогда затраты на заработную плату на десятих монтажников за 37 рабочих дня составят:

$$S_{3_п} = 10 \cdot 37 \cdot 5\,393,22 = 1\,995\,491 \text{ руб.}$$

Далее необходимо учесть отчисления на социальные нужды, которые составляют 39%, из которых 31,6% идет в Пенсионный фонд, 5,4% – на социальной страхование и 2% в Фонд занятости.

Тогда общие затраты на заработную плату составят:

$$S_3 = 1,39 \cdot (1\,135\,714,3 + 1\,995\,491) = 4\,352\,375,37 \text{ руб.}$$

Теперь необходимо рассчитать транспортировку всего оборудования до места установки. Трансформаторы производятся в г. Барнаул. Стоимость доставки была рассчитана с помощью калькулятора на сайте транспортной компании «Витэка» и составила 56 985 руб. Все остальное оборудование планируется доставлять из Москвы грузовыми машинами. На данный момент отсутствуют точные данные о весе и габаритах груза, поэтому была рассчитана примерная стоимость доставки, равная 1 024 666 руб. Таким образом, затраты на транспортировку всего оборудования составят 1 081 651 руб.

Затраты на утилизацию не были учтены в связи с отсутствием фактических данных из-за малого количества пилотных проектов. Эксплуатационные затраты были рассчитаны на один год, поэтому стоимость ремонта также не была учтена. Более того, ИРСН является довольно надежной системой с большим сроком службы, не требующей постоянных ремонтов. Исходя из этого, предполагаемая потребность в ремонте в течение срока службы является очень низкой и экономически незначимой в рамках совокупной стоимости владения.

Этап 5. Модель расчета стоимости монтажа ИРСН

Установка ИРСН является следующим ключевым шагом после её покупки и напрямую сказывается на общей стоимости владения системой.

Монтаж включает в себя ряд мероприятий, связанных с установкой оборудования на месте, его интеграцией с уже существующими инженерными и электрическими системами, а также проведением необходимых проверок и испытаний.

Для реализации этого этапа требуются квалифицированные специалисты, специальные инструменты и материалы, что необходимо учитывать при расчете стоимости.

Стоимость монтажа ИРСН складывается из следующих составляющих:

1. Стоимость трудовых ресурсов ($C_{\text{труд}}$). Этот компонент включает затраты на оплату труда квалифицированных специалистов, таких как монтажники, инженеры и электрики, которые занимаются установкой и наладкой оборудования. Расчет стоимости труда осуществляется на основе часового тарифа специалистов и предполагаемого времени выполнения работы.

2. Затраты на материалы и комплектующие ($C_{\text{мат}}$). В процессе установки могут потребоваться дополнительные материалы и комплектующие, такие как кабели, крепежные элементы, изоляционные материалы и защитные покрытия. Цена на материалы зависит от технических требований к монтажу и текущих рыночных цен на эти товары.

3. Расходы на использование специального оборудования ($C_{\text{об}}$). Для выполнения монтажных работ могут понадобиться специализированные инструменты и оборудование, такие как подъемные механизмы, сварочные аппараты, измерительные приборы и прочее. Если у заказчика нет необходимого оборудования, возможно, потребуется его аренда или покупка, что также скажется на общей стоимости монтажа.

4. Дополнительные расходы и непредвиденные затраты ($C_{\text{доп}}$). В эту статью затрат входят расходы на подготовительные работы (например, демонтаж старого оборудования), а также возможные непредвиденные затраты, которые могут возникнуть во время монтажа (примем 10% от общей стоимости установки) и помогают покрыть затраты на незапланированные работы и материалы.

5. Расходы на пусконаладочные работы ($C_{\text{ппр}}$). После установки оборудования требуется провести пусконаладочные работы, которые включают проверку системы, калибровку, настройку параметров и первичное тестирование. Расходы на эти работы охватывают оплату труда технических специалистов, осуществляющих все необходимые процедуры для подготовки системы к полноценной эксплуатации.

Этап 6. Модель расчета стоимости эксплуатации ИРСН (совокупная стоимость владения каждой технической системы для обогрева)

Чтобы определить совокупную стоимость владения ИРСН на этапе эксплуатации, необходимо учитывать все затраты, связанные с использованием системы на протяжении её жизненного цикла. Этот этап включает расходы на электроэнергию, техническое обслуживание, ремонт, амортизацию оборудования и, при необходимости, обучение сотрудников. Все эти факторы влияют на эксплуатационные расходы и должны быть учтены для полного понимания стоимости владения ИРСН.

При расчете эксплуатационных затрат следует учитывать несколько факторов, которые могут повлиять на общую сумму:

1. Активное использование приводит к увеличению потребления электроэнергии и износу оборудования, что в свою очередь увеличивает расходы на обслуживание и ремонт.

2. Параметры питающей сети и температурные условия на объекте могут ускорять износ оборудования, что приводит к более частым ремонтам и повышенным затратам на обслуживание.

3. Чем дольше используется система, тем выше амортизационные расходы, а также увеличиваются потенциальные затраты на ремонты.

Основные компоненты, формирующие совокупную стоимость владения ИРСН на этапе эксплуатации:

1. Стоимость потребляемой электроэнергии (Ц_{эл}). Одной из наиболее значимых статей затрат при эксплуатации ИРСН является стоимость электроэнергии, потребляемой системой. Расчет этого компонента основан на рабочей мощности системы, средней стоимости электроэнергии и времени работы системы в год. Формула для расчета годовых расходов на электроэнергию:

$$Ц_{эл} = P_{\Sigma} \cdot T \cdot C_{эл}, \quad (9)$$

где T – годовое время работы, ч; C_{эл} – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.

2. Затраты на техническое обслуживание и ремонты (Ц_{тех}). Для поддержания стабильной работы ИРСН требуется регулярное техническое обслуживание, которое включает проверки, калибровку, замену расходных материалов и плановые ремонты. Расходы на обслуживание могут быть определены как процент от первоначальной стоимости оборудования или на основе текущих рыночных цен на техническое обслуживание подобного оборудования.

3. Амортизационные расходы (Ц_{аморт}). Амортизация оборудования отражает его износ и уменьшение стоимости по мере времени. Она может быть рассчитана с использованием линейного метода, который предполагает равномерное распределение расходов на протяжении всего срока службы системы. Формула для расчета амортизации:

$$Ц_{аморт} = \frac{Ц_0}{N}, \quad (10)$$

где N – срок службы ИРСН, лет.

4. Расходы на обучение персонала (Ц_{обуч}). Если использование ИРСН требует специальной подготовки сотрудников, следует учесть расходы на обучение. Эти затраты могут включать расходы на проведение учебных мероприятий, оплату труда преподавателей и организационные расходы. Расходы на обучение персонала можно рассчитать, исходя из числа сотрудников и стоимости обучения для одного человека.

5. Дополнительные и непредвиденные расходы (Ц_{доп}). В этот пункт включены расходы на устранение неожиданных неисправностей, замену отдельных компонентов или обновление системы. Обычно такие затраты составляют не более 10% от общего объема эксплуатационных расходов и учитываются при расчете полной стоимости владения.

Этап 7. Расчет ОПЕХ

Предположим, что ИРСН работает круглогодично без перерывов, тогда время работы составит 8 760 ч/год. Годовое потребление энергии рассчитывается по формуле 11:

$$Q = P_{\Sigma} \cdot T, \quad (11)$$

где P – суммарное потребление электроэнергии; T – время работы системы.

Подставляя значения, получим:

$$Q = 90,053 \cdot 8\,760 = 788\,864,28 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Для коммерческих предприятий второй категории надежности в Ямало-Ненецком АО тарифная ставка на электроэнергию составляет $t = 3,63688$ руб./кВт·ч. [11].

Тогда годовые затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле 12:

$$S = Q \cdot t, \quad (12)$$

Где Q – годовое потребление энергии; t – тарифная ставка на электроэнергию.

Подставим значения:

$$S_{\Sigma} = 788\,864,28 \cdot 3,63688 = 2869\,004,72 \text{ руб./год}.$$

Этап 8. Совокупная стоимость владения ИРСН

Сведем совокупную стоимость владения ИРСН в таблицу 2.

Для того, чтобы сравнить суммарные финансовые затраты на две системы обогрева, сведем все капитальные и эксплуатационные затраты на обогрев индукционно-резистивной системой обогрева и на обогрев паром в таблицу 3. Далее проведем анализ об эффективности и целесообразности внедрения ИРСН, основываясь на финансовых затратах на две системы обогрева.

Анализируя таблицу 3, делаем вывод, что внедрение индукционно-резистивной системы нагрева получается гораздо дешевле, чем паровая система (на 310 189 498,7 руб.). Несмотря на это, большинство промышленных объектов нефтегазовой отрасли в России все еще используют системы обогрева, созданные и внедренные еще в советское время.

Таблица 2

Совокупная стоимость владения ИРСН

№	Статья затрат	Стоимость, руб.	Кол-во	Сумма, руб.
ОРЕХ				
1	Потребление электроэнергии	3,63688	788 864,28 кВт·ч	2 869 004,72
2	Непредвиденные расходы	2 869 004,72	10%	286 900,472
ИТОГО		3 155 905,19		
CAPEX				
3	ИРСК	9 597	896 шт.	8 598 912
4	ИРКК	19 997	4 шт.	79 988
5	ИРН	711,23	62 700 м	44594121
6	ИРПК	53 960	4 шт.	215 840
7	Термопаста	11 117,02	47	522 499,94
8	Втулки ТС 40	79	896 шт.	70 784
9	ИРП	1200	62 700 м	75 240 000
10	КТП с трансформатором	60 580 000	2 шт.	121 160 000
11	Датчики температуры трубы	8 950	8	71 600
12	Датчики температуры окружающего воздуха	2 548	4	10 192
13	Лента крепежная	2 086	627	1307922
14	Заработная плата инженеров-проектировщиков	378 571,58	3 чел.	1 135 714,3
15	Заработная плата монтажников	199 549,14	10 чел.	1 995 491
16	Отчисления на социальные нужды	1 913 955,79	1	1 913 955,79
17	Транспортировка	1 081 651	1	1 081 651
ИТОГО		257998671		
18	Непредвиденные расходы	257 998 671	10%	25 799 867,1
ИТОГО		283 798 538,1		
ИТОГО (CAPEX+ОРЕХ)		286 954 443,3		

Таблица 3

Сравнение затрат на обогрев паром и ИРСН

№	Статья затрат	Способ обогрева	
		ИРСН	Парообогрев
1	Эксплуатационные затраты (ОРЕХ), руб.	3 155 905,19	8 943 830,03
2	Капитальные затраты (CAPEX), руб.	283 798 538,1	588 200 112,0
3	ОРЕХ+ CAPEX, руб.	286 954 443,3	597 143 942,0

Наиболее распространенным способом поддержания температуры нефти и других технологических жидкостей в условиях холодного климата является паровой обогрев. Объясняется это тем, что во многих регионах уже есть установленные паровые котлы и трассы, а стоимость природного газа для нефтегазовых компаний очень низкая, что и делает эксплуатацию паровых систем привычной и доступной. Вместо замены системы обогрева, предприятия обычно поддерживают привычные им системы в рабочем состоянии с помощью частичных ремонтов, замены каких-то комплектующих. Это делает капитальные затраты низкими в краткосрочной перспективе, но в долгосрочной же перспективе, это только усугубляет проблему. Паровые системы обладают довольно низким КПД, по сравнению с современными системами обогрева. Также такие системы подвержены коррозии, из-за чего постоянно нуждаются в техническом обслуживании.

Индукционно-резистивные системы нагрева имеют ряд преимуществ, включая высокий КПД, а также экологическую безопасность, так как при эксплуатации такой системы не требуется сжигание топлива. Переход на ИРСН требует довольно высоких капитальных затрат, которые окупаются благодаря довольно низким эксплуатационным затратам. Все это стратегически оправдывает внедрение индукционно-резистивных систем обогрева трубопроводов, как альтернативу устаревшему паровому обогреву.

Выводы

Паровые системы обогрева до сих пор остаются востребованными еще с советских времен, несмотря на низкий КПД и сложность обслуживания. В качестве замены имеющихся систем обогрева предложено использовать индукционно-резистивные системы нагрева, отличающихся высокой энергоэффективностью, пожаробезопасностью и соответствием экологическим стандартам.

Разработана методика технико-экономической оценки внедрения индукционно-резистивных систем нагрева для обогрева нефтяных трубопроводов в условиях северного климата. Разработанная методика оценки совокупной стоимости владения индукционно-резистивной системой нагрева помогает комплексно оценить все затраты на внедрение ИРСН. С помощью данной методики можно наиболее точно рассчитать предстоящие затраты, так как она включает расходы не только на закупку оборудования, но и на доставку, эксплуатацию, возможные ремонты и утилизацию, а также учтены непредвиденные расходы, составляющие 10% от эксплуатационных и капитальных затрат.

Для экономического расчета сначала была рассчитана мощность ИРСН для определения суммарного потребления электроэнергии. Далее был произведен расчет совокупной стоимости владения индукционно-резистивной системой нагрева и паровой системы по модели, разработанной во второй главе. Затраты были разбиты на капитальные (CAPEX), включающие расходы на оборудование, доставку, заработную плату монтажникам и проектировщикам и эксплуатационные (OPEX), которые включают в себя годовые затраты на электроэнергию.

В результате расчета было выявлено, что при внедрении ИРСН годовые эксплуатационные затраты снижаются на 65%, по сравнению с паровой системой обогрева. Капитальные затраты также сильно ниже, чем на паровой обогрев. Стоит учесть, что капитальные затраты на паровой обогрев рассчитаны с учетом паровых котлов и трасс, которые уже есть во многих регионах с советских времен. Многие промышленные предприятия используют имеющиеся паровые системы, поддерживая их в рабочем состоянии, так как с десятками лет уже привыкли, а газ для нефтегазовых компаний является довольно дешевым. Представленный расчет обосновывает целесообразность замены имеющихся систем обогрева на индукционно-резистивные системы, так как более низкие эксплуатационные затраты позволяют окупить систему, а далее уже экономить на расходах. Также не стоит забывать, что при работе ИРСН не выделяется выбросов продуктов сгорания в атмосферу, что делает ее экологически безопасной, а благодаря способности к автоматическому управлению, не требует постоянного человеческого контроля.

Благодарности

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № FSWF-2025-0010 «Разработка научно-технических основ создания программных и аппаратных решений для управления объектами энергетики с использованием цифровых двойников и технологий искусственного интеллекта». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература

1. Сериков Г.С., Серикова И.А., Жилкин О.С., Головня А.Р. Моделирование процессов в системах индукционного нагрева на нефтегазовых коммуникациях в условиях крайнего севера // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2025. № 2 (33). С. 39-49. DOI: 10.36622/2541-9110.2025.33.2.004 EDN: CWIXQK.
2. Славкина М.В. Нефтегазовый комплекс и модернизация 1945-2008 годов: проблемы экономической истории и перспективы развития // Вестник Челябинского государственного университета. 2012. № 7 (261). Вып. 49. С. 65-74. EDN: OYDTLX.
3. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли: справочник. 2-е изд. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 524 с. ISBN: 978-5-9729-1208-7 EDN: UAMFZN.

4. Николаев А.К., Зарипова Н.А., Пшенин В.В. Повышение эффективности эксплуатации систем надземных нефтепроводов, оборудованных электрообогревом // Технологии нефти и газа. 2021. № 4 (135). С. 50-55. DOI: 10.32935/1815-2600-2021-135-4-50-55 EDN: SSZKHT.
5. Колосова Н.В., Кочура О.А, Плаксина Е.В. Расчет мощности электроподогрева технологического трубопровода для нефтепродуктов // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2021. № 3 (24). С. 22-26. EDN: SKQDEP.
6. Николаев А.К., Плотникова К.И., Бадашина Н.А., Фидусь А.И. Оценка эффективности работы нефтепровода, оборудованного системой подогрева, при транспортировке высоковязких нефтей // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 3-4. С. 16-20. DOI: 10.24412/0131-4270-2022-3-4-16-20 EDN: GMYWPE.
7. Половникова Л.Б., Половников Б.Д. Повышение энергоэффективности и энергосбережения на Пуртазовской промплощадке ООО «Газпром трансгаз Сургут» // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7. № 3 (27). С. 41-52. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-3-41-52 EDN: ZHEIYC.
8. Салиева А.С., Аралов Е.С., Гармонов К.В. Методы расчета и контроля показателей надежности магистральных трубопроводов // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура, 2025, № 1 (32), С. 55-62. DOI: 10.36622/2541-9110.2025.32.1.006 EDN: AWDVVN.
9. Robidas B., Gogoi S.B. Economic analysis of transportation of crude oil of Upper Assam Basin through pipeline. 2024. SN Bus Econ 4, 90. DOI: 10.1007/s43546-024-00693-8 EDN: PLMXLZ.
10. Muñoz Jose, Ancheyta Jorge Techno-Economic Analysis of Heating Techniques for Transportation of Heavy Crude Oils by Pipeline // Electronic Journal. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4040989.
11. Распоряжение № 31 / Региональная энергетическая комиссия Тюменской области, Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, Ямало-Ненецкого автономного округа. Тюмень, 06.12.2024.