

## АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕФТИ В РЕЗЕРВУАРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

**В. И. ЗАВОРОХИН, канд. техн. наук, доц. М. В. ТЕРЕНТЬЕВА**

*Ухтинский государственный технический университет,  
Ухта, Россия*

**Аннотация.** В работе рассматривается автономная система поддержания температуры нефти в вертикальных стальных резервуарах (РВС) с использованием солнечных панелей. Цель исследования – снижение тепловых потерь, поддержание оптимальной вязкости нефти и повышение сохранности продукта при минимизации энергозатрат. Разработана методика расчета теплопотерь резервуара объемом 5000 м<sup>3</sup> с теплоизоляцией из минеральной ваты и оценка эффективности интеграции солнечных панелей и трубчатых электронагревателей для компенсации этих потерь. Проведен расчет требуемой электрической мощности, количества солнечных панелей и срока окупаемости проекта. Результаты показали, что установка 54 солнечных панелей позволяет полностью компенсировать годовые теплопотери (47 490 кВт·ч) и обеспечивает срок окупаемости около 3,5 лет. Предложенная система повышает энергетическую автономность объектов нефтяной инфраструктуры, снижает углеродный след и эксплуатационные расходы.

**Ключевые слова:** резервуары вертикальные стальные, автономная система подогрева, солнечные панели, теплопотери, энергоэффективность, экономическая окупаемость, трубчатые электронагреватели, нефтяная промышленность, энергетическая автономность.

Поддержание оптимальной температуры нефти в резервуарах вертикальных стальных (РВС) является важной задачей для минимизации тепловых потерь, снижения вязкости и обеспечения сохранности продукта. В настоящее время применение автономных систем на основе солнечной энергии не только позволяет достичь энергетической независимости объектов нефтяной инфраструктуры, но и способствует сокращению эксплуатационных затрат и углеродного следа. Учитывая современный уровень развития технологий возобновляемой энергетики, интеграция солнечных панелей и накопителей энергии в системы подогрева представляет собой перспективное направление для повышения эффективности и экологической устойчивости предприятий топливно-энергетического комплекса. Именно сочетание климатических условий и энергетических потребностей региона делает Гомельскую область Республики Беларусь благоприятной средой для успешного внедрения и демонстрации эффективности данного решения.

Целью работы является: расчет и анализ эффективности использования солнечных панелей, размещенных на поверхности стенки резервуара вертикального стального, для поддержания оптимальной температуры нефти, учитывая сезонные изменения климатических условий и географические особенности региона.

Выбор оптимального региона для внедрения солнечных панелей требует комплексного подхода и учета двух ключевых групп факторов. Во-первых, это климатические условия, определяющие как потенциал солнечной генерации (количество часов солнца в году), так и потребность в обогреве (продолжительность и суровость зимнего периода, средние температуры). Во-вторых, наличие и потребности нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий.

На основе вышеперечисленных факторов была выбрана Гомельская область. Данный выбор обусловлен уникальным сочетанием благоприятных условий. С одной стороны, регион

характеризуется одним из самых высоких в Беларуси уровней солнечной радиации, сопоставимым с южными областями страны – здесь насчитывается более 2000 часов солнца в году, что гарантирует высокую выработку электроэнергии. С другой стороны, наличие развитой нефтяной отрасли, создает реальную потребность в энергоэффективных решениях для поддержания температуры в резервуарах в условиях Беларуси.

**Расчет теплотерь.** В расчетах примем во внимание, что тепловой поток исходит из боковой стенки резервуара и из его крыши как показано на рисунке 1.

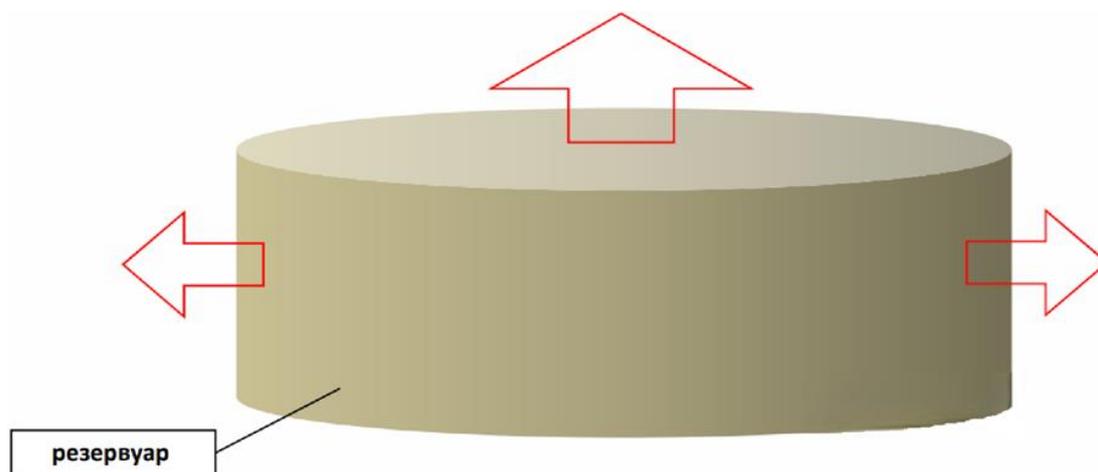


Рисунок 1. – Тепловые потоки исходящие от резервуара

Рассчитаем тепловые потери РВС объемом 5000 м<sup>3</sup> с теплоизоляцией из плит минеральной ваты при начальных данных, изображенных в таблице 1.

Таблица 1. – Начальные данные для расчета тепловых потерь

Обозначение	t <sub>вн</sub> , °C	t <sub>з</sub> , °C	t <sub>в</sub> , °C	t <sub>л</sub> , °C	t <sub>о</sub> , °C	λ, Вт/м <sup>2</sup> *°C	λ <sub>из1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> *°C	λ <sub>из2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> *°C
значение	70	-4	8	19	7	0.5	0.064	221

Окончание таблицы 1

Обозначение	λ <sub>н</sub> , Вт/м <sup>2</sup> *°C	δ, м	δ <sub>из1</sub> , м	δ <sub>из2</sub> , м	δ <sub>н</sub> , м	h, м	d, м
значение	0.15	0.006	0.15	0.001	10.46	15	20.92

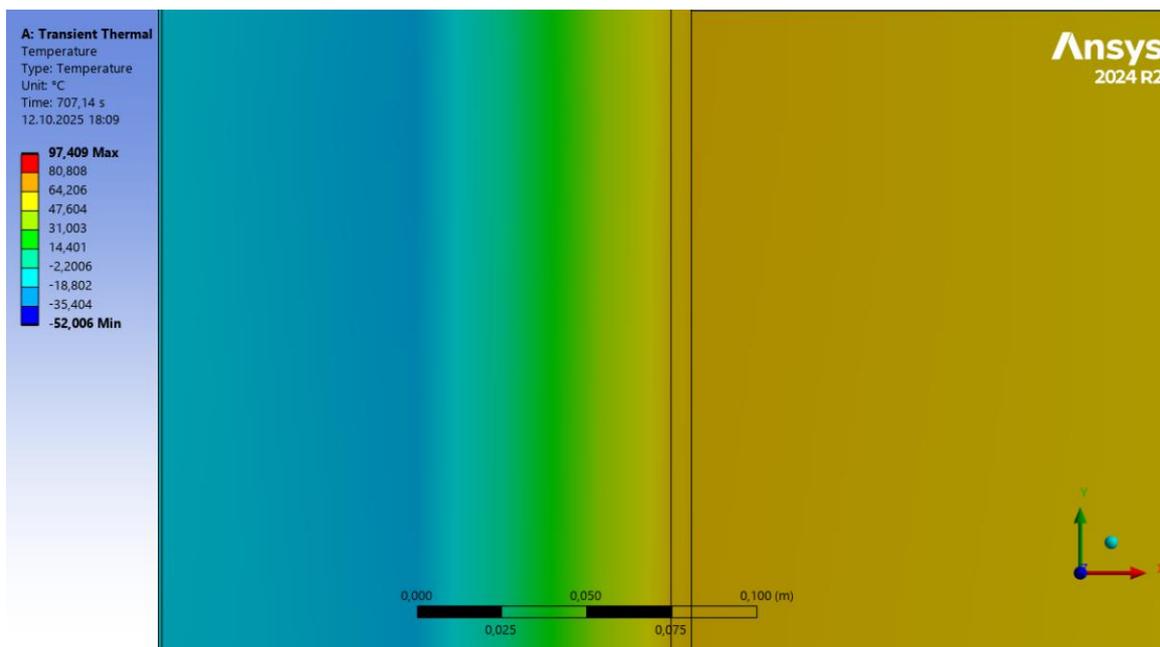
Формула для расчета плотности теплового потока плоской многослойной стенки:

$$q = \frac{(t_{вн} - t_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$

$$Q = q \cdot S$$

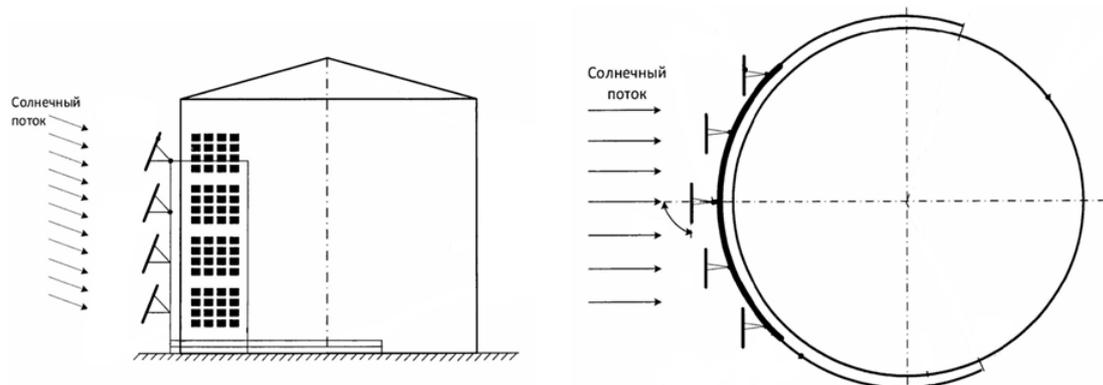
Исходя из вышеперечисленного значение тепловых потерь за год получим равное 47 490 кВт\*ч.

На рисунке 2 можем рассмотреть распространение температуры в резервуаре от нефти к внешнему слою за один час.



**Рисунок 2. – Схема распространения температуры**

На рисунке 3 показано размещение солнечных панелей на одной трети боковой стенки резервуара вертикального стального (PVC). На основе данного расположения солнечных панелей были выполнены последующие расчеты их экономической эффективности и окупаемости.



**Рисунок 3. – Расположение солнечных панелей на резервуаре**

Для компенсации расчетных теплотерь и поддержания температуры нефти был выбран активный подогрев с использованием трубчатых электронагревателей (ТЭНов), размещенных непосредственно в резервуаре.

Данный метод был выбран благодаря следующим преимуществам:

- 1) Высокий КПД: Прямой контакт ТЭНа с продуктом обеспечивает эффективную передачу тепла.
- 2) Равномерный нагрев: Правильное расположение ТЭНов позволяет минимизировать градиенты температуры в объеме нефти.
- 3) Простота автоматизации: Система легко интегрируется с термостатом или программируемым логическим контроллером для поддержания заданной температуры в оптимальном диапазоне, что исключает перегрев и снижает энергопотребление.
- 4) Надежность и долговечность: ТЭНы, выполненные из коррозионностойких материалов (например, нержавеющей стали), устойчивы к агрессивной среде нефти.

Ключевым компонентом, обеспечивающим круглосуточную и всесезонную работу системы подогрева, являются аккумуляторные батареи. Они выполняют функцию буфера, накапливая избыток электроэнергии, вырабатываемой солнечными панелями в светлое время суток, и отдавая ее для питания трубчатых электронагревателей в периоды недостаточной инсоляции – ночью и в пасмурные дни.

При выборе типа аккумуляторов для таких систем предпочтение отдается современным необслуживаемым моделям, таким как свинцово-кислотные AGM (Absorbent Glass Mat) или гелевые (GEL) батареи, которые обладают высокой надежностью, герметичностью и не требуют дополнительного обслуживания. Еще более перспективными являются литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы, которые отличаются большей глубиной разряда, длительным сроком службы и высокой удельной энергоемкостью, что позволяет уменьшить габариты и вес энергонакопительной установки, хотя их начальная стоимость выше.

Аккумуляторный банк работает в связке с контроллером заряда, который оптимизирует процесс заряда и разряда, тем самым продлевая срок службы батарей. Интеграция накопителей энергии создает замкнутый энергетический контур, делая объект полностью энергонезависимым от внешних сетей и обеспечивая надежность и устойчивость системы поддержания температуры нефти в резервуаре.

Для оценки экономической целесообразности проекта определено количество солнечных панелей, необходимых для компенсации тепловых потерь резервуара, и рассчитан срок их окупаемости.

**Определение требуемой электрической мощности.** Годовые тепловые потери резервуара, рассчитанные ранее, составляют  $Q_{\text{год}} = 47\,490$  кВт·ч. Для компенсации этих потерь используется система подогрева на основе трубчатых электронагревателей (ТЭНов), КПД которых принимается равным  $\eta_{\text{ТЭН}} = 0,90$ .

Требуемая электрическая мощность, потребляемая от энергосистемы (включая солнечные панели), для покрытия годовых тепловых потерь рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{эл.потр}} = \frac{Q_{\text{год}}}{\eta_{\text{ТЭН}}}$$
$$W_{\text{эл.потр}} = \frac{47490}{0,90} = 52766 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

С учетом возможных дополнительных потерь в системе электроснабжения и для обеспечения надежности работы, требуемый объем генерации принят с запасом и составляет  $W_{\text{треб}} = 53\,800$  кВт·ч.

Расчет количества солнечных панелей:

Для расчета использованы данные о солнечных панелях со следующими характеристиками:

Номинальная мощность:  $P_{\text{панели}} = 590$  Вт.

Стоимость одной панели:  $G_{\text{панели}} = 12\,400$  руб.

Учитывая, что в реальных условиях эксплуатации панель выдает в среднем 80% от номинальной мощности, ее фактическая средняя выходная мощность составляет:

$$P_{\text{факт}} = P_{\text{панели}} \cdot 0,80$$

$$P_{\text{факт}} = 590 \cdot 0,80 = 472 \text{ Вт}$$

Для определения количества панелей, необходимых для генерации 52 766 кВт·ч в год, требуется учесть суммарную продолжительность солнечной генерации в выбранном регионе (Республика Бурятия).

Примем для расчета  $t_{\text{солн}} = 2037$  ч/год.

Общая требуемая электрическая мощность от солнечных панелей в час составит:

$$W_{\text{треб.час}} = \frac{W_{\text{треб}}}{t_{\text{солн}}}$$
$$W_{\text{треб.час}} = \frac{53800}{2037} = 26,41 \text{ кВт}$$

Тогда необходимое количество солнечных панелей рассчитывается как:

$$N_{\text{панелей}} = \frac{W_{\text{треб.час}}}{P_{\text{факт}}}$$
$$N_{\text{панелей}} = \frac{26410}{472} = 56 \text{ шт.}$$

Для обеспечения требуемой производительности с запасом принято решение об установке 54 солнечных панелей.

Расчет капитальных затрат и срока окупаемости:

Капитальные затраты на приобретение солнечных панелей:

$$K_{\text{панелей}} = (N_{\text{панелей}} \cdot G_{\text{панелеи}}) + G_{\text{монтаж}}$$
$$K_{\text{панелей}} = (56 \cdot 12400) + 400000 = 1094400 \text{ руб.}$$

Годовая экономия на электроэнергии: при стоимости электроэнергии  $G_{\text{эл}} = 6,0$  руб./кВт·ч годовая экономия составит:

$$K_{\text{панелей}} = W_{\text{эл.потр}} \cdot G_{\text{эл}}$$
$$K_{\text{панелей}} = 52766 \cdot 6,0 = 316596 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости ( $T_{\text{ок}}$ ) капитальных вложений в солнечные панели:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{панелей}}}{R_{\text{год}}}$$
$$T_{\text{ок}} = \frac{1094400}{316596} = 3,5 \text{ лет.}$$

Таким образом, расчетный срок окупаемости системы солнечной генерации составляет около 3,5 лет, что подтверждает высокую экономическую эффективность проекта.

**Заключение.** Проведенное исследование демонстрирует высокую техническую и экономическую целесообразность внедрения системы поддержания температуры нефти в вертикальных стальных резервуарах, основанной на теплоизоляции и энергии солнца.

На примере Гомельской области, обладающей уникальным сочетанием высокого уровня солнечной инсоляции и развитой нефтегазовой инфраструктуры, доказана эффективность

данного подхода. Разработанная методика позволила оценить годовую величину теплопотерь резервуара объемом 5000 м<sup>3</sup>, которая составила 47 490 кВт. Для их компенсации предложено использовать систему подогрева на основе трубчатых электронагревателей, питаемую от массива из 56 солнечных панелей, размещенных на одной трети поверхности резервуара.

Ключевым результатом работы является расчет экономической эффективности. Несмотря на первоначальные капиталовложения, срок окупаемости проекта составляет около 3,5 лет.

Таким образом, реализация подобных систем открывает путь к оптимизации расходов в нефтяной отрасли, снижению углеродного следа отрасли и повышению энергетической самостоятельности удаленных промышленных объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Обогрев вертикального стального резервуара с рапсовым маслом объем 750 м<sup>3</sup> [Электронный ресурс]. – <https://clck.ru/3Kyf3H> (23.09.2025).
2. Солнечный модуль SunPro DG590-N144M10 (TOPCon) [Электронный ресурс]. – <https://tokarsenal.ru/alternativnaya-energetika/solnechnyj-modul-sunpro-dg590-n144m10-topcon> (23.09.2025).
3. Использование солнечных электростанций в нефтегазовой отрасли – технологический и экологический аспекты [Электронный ресурс]. – <https://clck.ru/3KyjP9> (25.09.2025).
4. СП 365.1325800.2017. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для хранения нефтепродуктов. Правила производства и приемки работ при монтаже [Текст]. – Введ. 2018-06-14. – М.: Стандартинформ, 2018. – 87 с. (20.09.2025).