

Исх № б/н от 01.09.2016 г.

Технико-экономическая оценка эффективности геотермального теплового насоса для отопления жилого дома

1. Введение

В данной работе выполнены технико-экономические расчеты по определению эффективности использования геотермального теплового насоса (ТН) для отопления жилого (гостевого) дома в г. Сортавала.

В работе использованы расчетные модели по оценке окупаемости тепловых насосов к.т.н. Гершковича В.Ф., модели учета стоимости жизненного цикла энергоемкого оборудования, к.т.н. Штейнмиллера О.А., информации из открытых источников (компаний Будерус, Броск, Данфосс).

С краткими выводами о целесообразности использования оборудования приведены в разделе 7 данной работы. Ниже последовательно изложены общие сведения по предлагаемой технологии отопления жилого дома с использованием ТН, приведена модель для оценки сроков окупаемости оборудование и сравнение стоимости жизненных циклов отопительных систем с использованием сжиженного газа и ТН.

2. Принцип действия

Тепловой насос представляет устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (воздух, вода, грунт) к потребителю с более высокой температурой. Преобразование низкопотенциального тепла осуществляется за счет сжатия хладагента, вследствие чего повышается его температура.

По сути, тепловой насос представляет собой "транспортное устройство", которое переводит бесплатную тепловую энергию окружающей среды на более высокий уровень температур. Сказанное иллюстрирует рисунок 1.

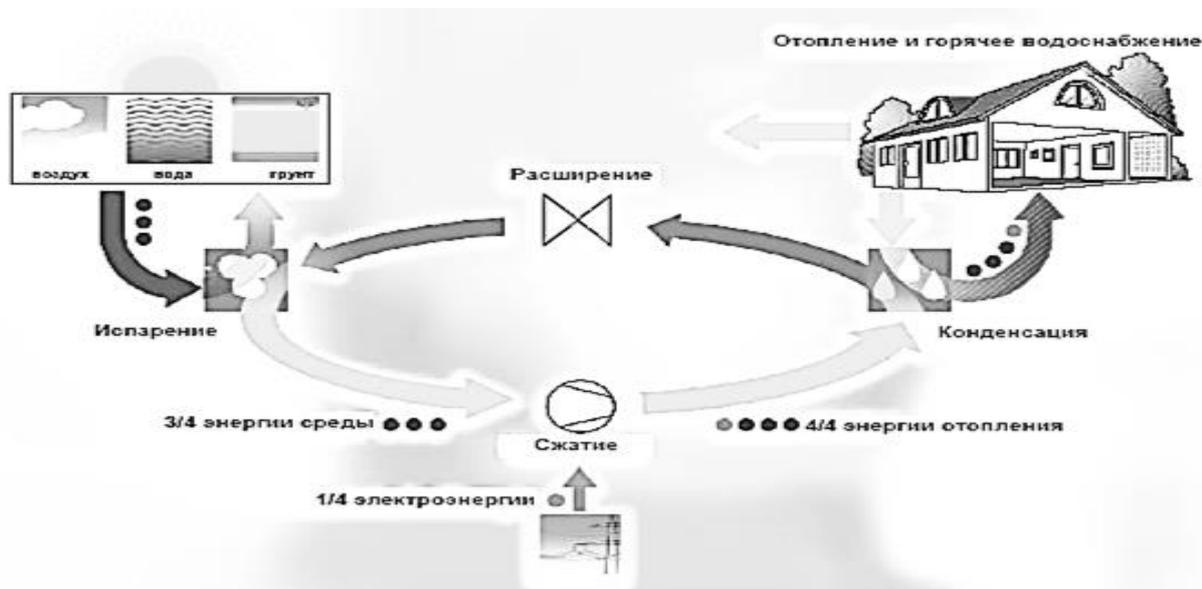
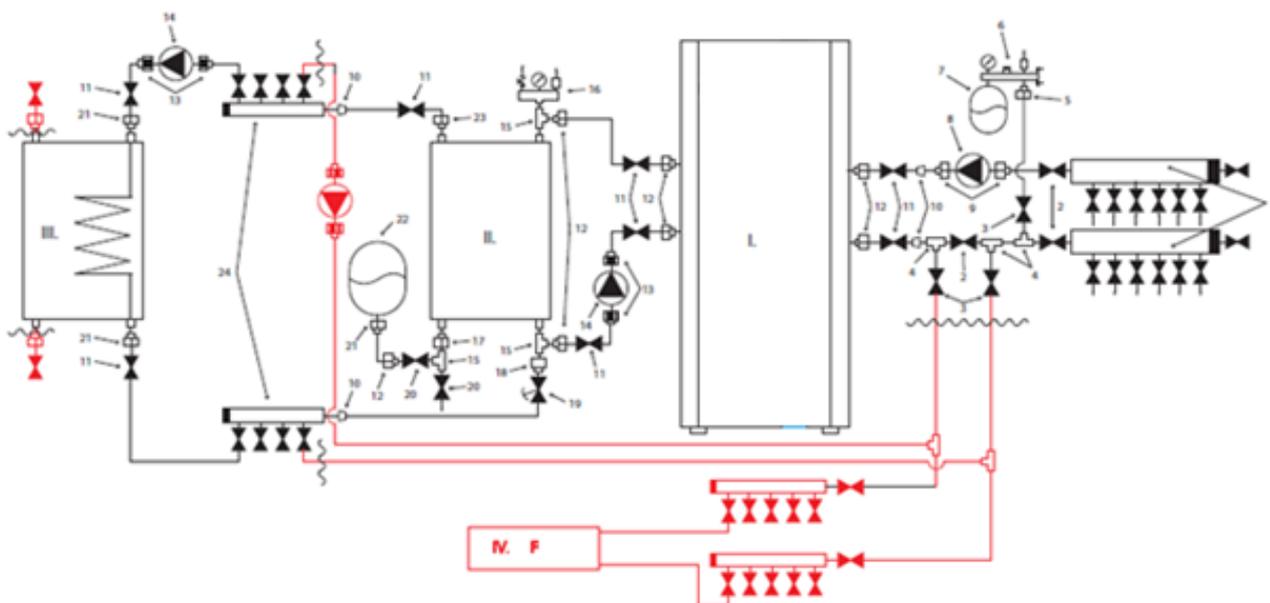


Рисунок 1. Принцип действия теплового насоса

Затраты энергии для осуществления такого перехода (преобразования теплоты) *не превышают 25%* от того количества энергии, которое можно бесплатно изъять из окружающей среды.

Тепловой насос можно использовать в качестве генератора тепла для нужд отопления, горячего водоснабжения и в качестве источника холода для системы кондиционирования. Теплогенераторная на базе теплового насоса может полностью заменить котельную на стандартных видах топлива. Компонентные решения (система отопления, горячего водоснабжения) за такой теплогенераторной не будут отличаться от классических решений с использованием котельных на стандартных видах топлива.

Тепломеханическая схема использования геотермального ТН, позволяющая покрыть потребности объема в отоплении, горячем водоснабжении и кондиционировании (далее по тексту «полная схема») представлена на рисунке 2.



Позиция	Наименование	Позиция	Наименование
I	Тепловой насос	5, 12, 17, 21, 23	Американка
II	Теплоаккумулятор	6, 16	Группа безопасности
III	Бак косвенного нагрева	7, 22	Расширительный бак
IV	Фанкойл	8, 14	Циркуляционный насос
1, 24	Коллектор	9	Американка
2, 3, 11, 20	Кран шаровой	10, 13, 18	Муфта переходная
4, 15	Тройник	19	Балансировочный кран

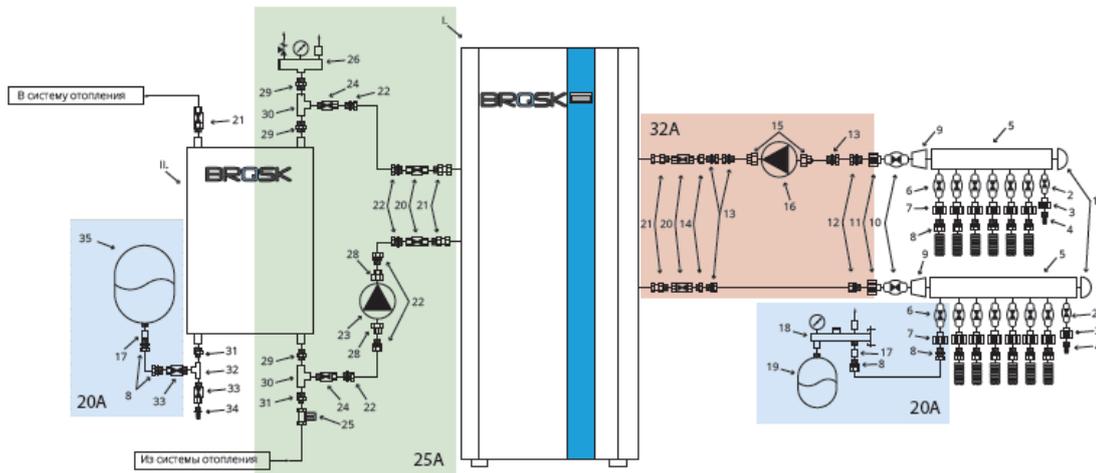
Рисунок 2. Тепломеханическая схема теплогенераторной на базе ТН

В данном случае зимой ТН отбирает тепло из грунта (геотермальные зонды подключаются к коллектору 1), летом избыточное тепло от фанкойлов отводится в грунт.

3. Исходные данные для расчета

В виду того, что объемно-планировочные решения дома №15 утверждены, на момент проведения данной работы на объекте ведутся строительные работы, а натурные данные по реальной теплопроводности грунтов на объекте отсутствуют, то реализация «полной схемы» (теплоснабжение, кондиционирование, горячее водоснабжение) сопряжена с рисками и дополнительными финансовыми затратами.

В этой связи предлагается использовать ТН исключительно для обеспечения потребности дома №1 в тепле в холодное время года. Схема теплогенераторной для этого варианта представлена на рисунке 3.



- | | |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1) Заглушка PPR 63 - 2 шт. | 11) Муфта комбинированная PPR 40 x 1 3/4" (H) - 2 шт. |
| 2) Кран шаровой PPR 20 - 2 шт. | 12) Муфта Neptun IWS 32 x 1 3/4" (B) - 2 шт. |
| 3) Муфта комбинированная PPR 20 x 1/2" (B) - 2 шт. | 13) Муфта Neptun IWS 32 x 1 3/4" (H) - 4 шт. |
| 4) Штуцер 3/4" x 20 (H) - 2 шт. | 14) Переход 1" x 1 3/4" - 4 шт. |
| 5) Труба PPR 63 - 2 м. | 15) Гайка накидная 1" x 1 1/4" - 2 шт. |
| 6) Кран шаровой PPR 25 - 13 шт. | 16) Циркуляционный насос Wilo Star-RS 30/8 - 1 шт. |
| 7) Муфта комбинированная PPR 25 x 3/4" (B) - 13 шт. | 17) Муфта соединительная 3/4" - 2 шт. |
| 8) Муфта Neptun IWS 20 x 3/4" (H) - 16 шт. | 18) Группа безопасности на кронштейне - 1 шт. |
| 9) Муфта переходная PPR 63 x 40 - 2 шт. | 19) Демпферный бак 8 л. - 1 шт. |
| 10) Кран шаровой PPR 40 - 2 шт. | 20) Кран шаровой 1" (B) - 4 шт. |
| 21) Американка 1" (B-H) - 4 шт. | 31) Ниппель переходной 1" x 3/4" - 2 шт. |
| 22) Муфта Neptun IWS 25 x 1" (H) - 6 шт. | 32) Тройник 3/4" (B) - 1 шт. |
| 23) Циркуляционный насос Wilo Star-RS 25/4 - 1 шт. | 33) Кран шаровой 3/4" (B-H) - 2 шт. |
| 24) Кран шаровой 1" (B-H) - 2 шт. | 34) Штуцер 3/4" x 20 (H) - 1 шт. |
| 25) Клапан радиаторный прямой 3/4" - 1 шт. | 35) Демпферный бак 18 л. - 1 шт. |
| 26) Группа безопасности котла - 1 шт. | |
| 27) Заглушка 3/4" (H) - 1 шт. | |
| 28) Гайка накидная 1" x 1 1/2" - 2 шт. | |
| 29) Ниппель 1" - 3 шт. | |
| 30) Тройник 1" - 2 шт. | |

Рисунок 3. Тепломеханическая схема теплогенераторной для отопления жилого дома №15 на базе теплового насоса «BROSK»

В качестве тепловых насосов предлагается использовать ТН отечественного производителя, фирмы «BROSK». Выбор производителя обусловлен наличием богатой экспериментальной базы, существенно более низкой стоимостью по сравнению с зарубежными аналогами, отсутствием рекламаций пользователей.

Подбор оборудования и технико-экономический анализ осуществлялся для следующих исходных данных (см. таблицу 1).

Таблица 1.

Наименование показателя и единица измерения	Значение, ссылка на документ
Характеристика объекта капитального строительства	
Назначение объекта	Жилой (гостевой) дом
Отапливаемая площадь, м ²	159.6
Строительный объем, м ³	800
Отапливаемый объем, м ³	650
Мощность отопительной системы, кВт	10 кВт
Расчетная температура внутреннего воздуха, °С	20
Расчетная температура наружного воздуха, °С	-29
Характеристика отопительного периода, °С · сутки	5330
Стоимость сжиженного газа	
Информация по стоимости газа, руб. за литр (источник 1)	до 100 км от КАД – по 17.0 руб./л, от 100 до 200 км – по 18.5 руб./л: http://gazsever.com/zapravka-gazolderov
Информация по максимальной стоимости газа, руб. за литр (источник 2)	Для газодefицитных регионов максимальная цена 20-25 рублей за литр: http://r-gas.ru/gaz_zapr_1.html
Информация по средней стоимости обслуживания газгольдера в год, руб	4000 – 30000: http://www.avtonomgaz.ru/info/vybor/stoimost-obsluzhivaniya-gazgoldera/
Тариф по данным Заказчика	33.93 рубля за кг или 33.93 x 0.54 = 18.3 рубля за литр
Капитальные затраты на установку газгольдера и котельного оборудования, руб	(596 000 + 988 000) / 2 = 792 000
Стоимость электроэнергии	
Цены (тарифы) на электрическую энергию для населения и приравненным к нему категориям потребителей, руб. за 1 кВт · час	3.15: http://www.energo-consultant.ru/sprav/tarifi_na_elektroenergiyu_v_2016/tarifi_na_elektroenergiyu_v_respublik_Karelia_2016
Цены (тарифы) на электрическую энергию для юридических лиц, руб. за 1 кВт · час	7.2 – 7.5: http://stolicaonego.ru/news/327768.html
Тариф по данным Заказчика, руб. за 1 кВт · час	5.95

4. Тарифы на энергоносители

Прежде всего, оценим эксплуатационную компоненту, связанную с покупкой энергоносителей.

Затраты на электрическую энергию, необходимую для работы теплового насоса, будут меньше, чем затраты на покупку сжиженного газа, если соблюдается неравенство

$$T_э < \frac{\varepsilon}{\eta} \cdot T_T, \quad (1)$$

где $T_э$ – тариф за электрическую энергию, T_T – тариф на традиционный энергоноситель (в данном случае сжиженный газ), ε – коэффициент преобразования теплового насоса, η – коэффициент полезного действия традиционного генератора тепла (в данном случае настенного котла).

С учетом текущего уровня цен (по данным заказчика 18.3 рубля за литр газа), имеем стоимость кВт-ч по сжиженному газу $T_T = \frac{18.3}{7.3} = 2.5 \frac{\text{руб}}{\text{кВт-ч}}$, стоимость кВт-ч электроэнергии (используется значение по данным Заказчика) $T_э = 5.95 \frac{\text{руб}}{\text{кВт-ч}}$, КПД настенного котла – 0.9, коэффициент преобразования теплового насоса $\varepsilon = 3.5$.

$$5.95 < \frac{3.5}{0.9} \cdot 2.5$$

$$5.95 < 9.7$$

Неравенство выполняется, следовательно эксплуатационные затраты при использовании теплового насоса с коэффициентом преобразования 3.5 будут ниже, чем при использовании котлов на сжиженном газе.

Оценим также минимальный коэффициент преобразования теплового насоса, при котором эксплуатационные затраты при его использовании на площадке строительства в г. Сортавала будут меньше, чем при использовании котлов на сжиженном газе:

$$T_э = \frac{\varepsilon}{\eta} \cdot T_T, \quad \varepsilon = \frac{T_э \cdot \eta}{T_T}, \quad \varepsilon = \frac{5.95 \cdot 0.9}{2.5} = 2.1$$

В самых неблагоприятных условиях эксплуатации коэффициент преобразования теплового насоса не опускается, как правило, ниже значения 2.9.

Фактически данный результат означает, что для условий объекта эксплуатационные затраты при использовании ТН всегда будут ниже, чем при использовании для целей отопления котельной на сжиженном газе.

Также отметим, что текущий тариф на электроэнергию ($5.95 \frac{\text{руб}}{\text{кВт-ч}}$) является исключительно высоким. Даже в этих условиях, эксплуатационная компонента по затратам энергоресурсов у теплового насоса ниже.

5. Срок окупаемости инвестиций при реконструкции существующих объектов

Оценим срок окупаемости инвестиций в ТН для жилого дома аналогичного дому №15 в условиях, когда газовое оборудование для него уже закуплено и эксплуатируется. Оценку срока окупаемости инвестиций в первом приближении можно рассматривать в этом случае как

отношение капитальных затрат на приобретение ТН к экономии эксплуатационных расходов на энергоносители за один год.

Экономия эксплуатационных расходов на энергоносители \mathcal{E} определяется следующим соотношением

$$\mathcal{E} = q \cdot \left(\frac{T_T}{\eta} - \frac{T_{\mathcal{E}}}{\varepsilon} \right), \quad (2)$$

где q – количество кВт·ч тепловой энергии, необходимое для отопления здания в течение одного отопительного периода.

Что касается величины q , то ее можно определить следующим соотношением:

$$q = \frac{10^{-3} \cdot 24 \cdot N \cdot S}{t_B - t_H},$$

где N – тепловая мощность, Вт, отопительной системы, S – число градусо-суток отопительного периода, $t_B - t_H$ – расчетная разность температур внутреннего и наружного воздуха.

Величина $\frac{10^{-3} \cdot 24 \cdot S}{t_B - t_H}$ характеризует климат района и для рассматриваемого района (юг Карелии) составляет $\frac{10^{-3} \cdot 24 \cdot S}{t_B - t_H} = \frac{10^{-3} \cdot 24 \cdot 5330}{49} = 2.6$

Тогда, имеем $q = 2.6 \cdot N$.

Для оценки капитальных затрат K на приобретение и установку теплового насоса удобно иметь оценки, связывающие тепловую мощность отопительной системы с величиной капитальных затрат.

Такие оценки имеются в работах к.т.н. Гершковича В.Ф. в виде простой линейной зависимости $K = 0.9 \cdot N \cdot V$, где V – валютный курс руб/USD. Оценка Гершковича, вероятно, представлена для зарубежного оборудования.

Для построения конкурирующей оценки нами использованы данные отечественного производителя оборудования (компании BROSOK). По результатам обработки данных о стоимости оборудования BROSOK и его монтажа нами получена следующая линейная оценка: $K = 30.228 \cdot N + 284966$

Простой срок окупаемости (без дисконта) определяется по формуле $C = \frac{K}{\mathcal{E}}$. Окончательно имеем две конкурирующие оценки для срока окупаемости инвестиций для существующих жилых домов апарт-отеля «Ладога»:

$$C = \frac{K}{\mathcal{E}} = \frac{0.9 \cdot N \cdot V}{q \cdot \left(\frac{T_T}{\eta} - \frac{T_{\mathcal{E}}}{\varepsilon} \right)} = \frac{0.9 \cdot N \cdot V}{2.6 \cdot N \cdot \left(\frac{T_T}{\eta} - \frac{T_{\mathcal{E}}}{\varepsilon} \right)} = \frac{0.35 \cdot V}{\left(\frac{T_T}{\eta} - \frac{T_{\mathcal{E}}}{\varepsilon} \right)} \quad (3.1)$$

$$C = \frac{K}{\mathcal{E}} = \frac{30228 \cdot N + 284966}{q \cdot \left(\frac{T_T}{\eta} - \frac{T_{\mathcal{E}}}{\varepsilon} \right)} = \frac{30.228 \cdot N + 284966}{2.6 \cdot N \cdot \left(\frac{T_T}{\eta} - \frac{T_{\mathcal{E}}}{\varepsilon} \right)} = \frac{11.626}{\left(\frac{T_T}{\eta} - \frac{T_{\mathcal{E}}}{\varepsilon} \right)} + \frac{284966}{2.6 \cdot N \cdot \left(\frac{T_T}{\eta} - \frac{T_{\mathcal{E}}}{\varepsilon} \right)} \quad (3.2)$$

Графическую иллюстрацию полученным результатам дают графики на рисунке 4, построенные для различных вариаций расчетных параметров.

Очевидно, что о приемлемых сроках окупаемости можно говорить только при использовании отечественного оборудования при средних (для РФ) ценах на электроэнергию. С тарифами для юридических лиц на электроэнергию использование ТН экономически обосновано только для условий газодефицитных регионов (с тарифом на сжиженный газ от 23 рублей за литр).

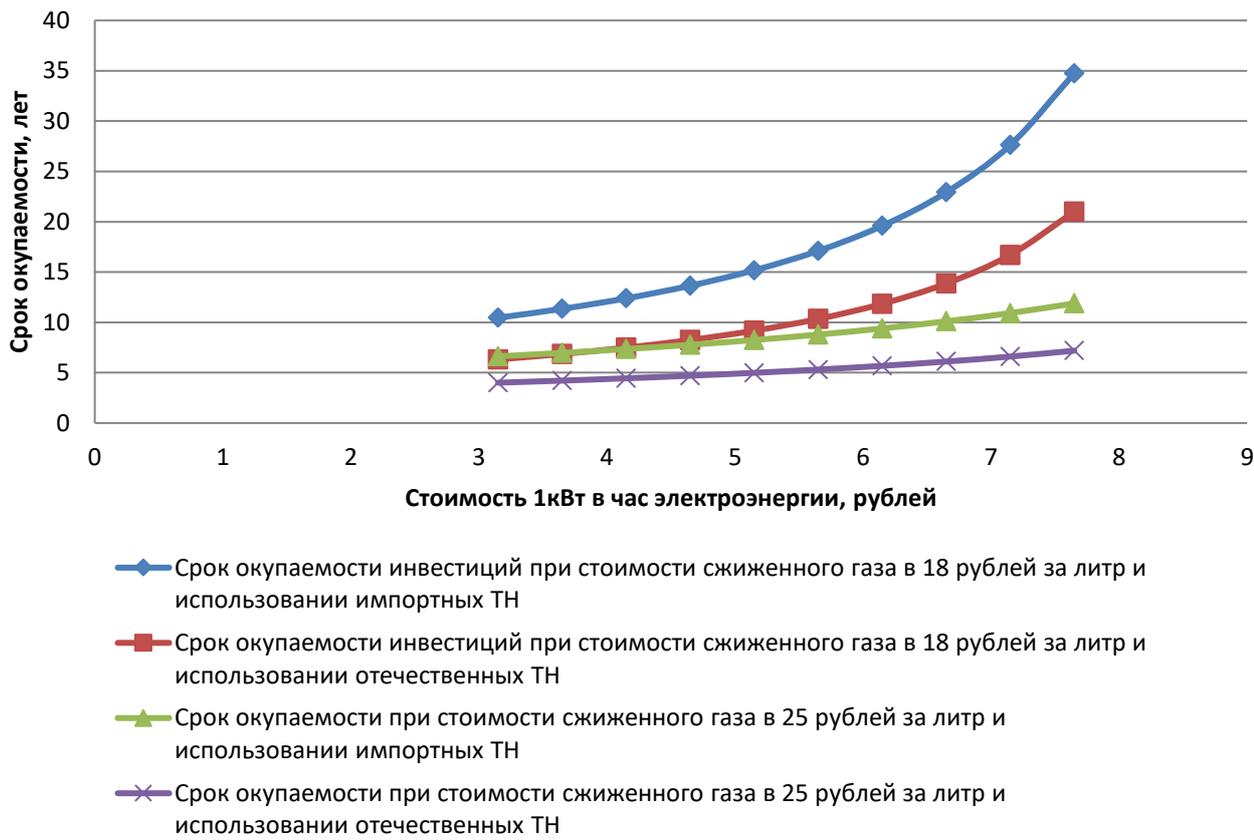


Рисунок 4. Оценка простой окупаемости (без дисконта) инвестиций при реконструкции существующей системы с сжиженным газом на систему с ТН (на примере объекта с характеристиками идентичными жилому дому №15)

6. Оценка стоимости жизненных циклов отопительных систем на сжиженном газе и тепловом насосе

Теперь рассмотрим задачу технико-экономического выбора варианта отопления жилого дома №15 в условиях нового строительства при наличии двух альтернатив: сжиженный газ и тепловой насос.

В качестве критерия сравнительной эффективности систем отопления на сжиженном газе и с применением тепловых насосов используется стоимость жизненного цикла отопительной системы.

В теоретическом плане подход основан на учете стоимости жизненного цикла оцениваемых схем теплоснабжения по различным вариантам, соответственно, предусматривает минимизацию совокупных затрат на строительство, эксплуатацию и завершение использования. Анализ стоимости жизненного цикла (в зарубежной практике принято сокращение LCC - Life Cycle Cost) – инструмент, который может помочь минимизировать затраты и повысить эффективность для многих типов систем, в том числе и для рассматриваемых систем теплоснабжения. Это результат некоторого развития широко

используемого и в российской практике технико-экономического метода минимизации приведенной стоимости.

Общее количество затрат за все время существования (жизненный цикл) любого оборудования включает в себя:

первоначальные (капитальные) затраты, в т.ч. стоимость проектных работ, цена приобретения, затраты на строительство и монтаж;

эксплуатационные затраты, в т.ч. затраты на электроэнергию, затраты на обслуживание (в том числе, на постоянный персонал), затраты на текущее восстановление (на сервисные и ремонтные работы, а также на запасные части), затраты на плановые и внеплановые простои (в т.ч. на ликвидацию аварий, на вывод из эксплуатации и ввод в работу), экологические затраты и др.;

затраты на прекращение деятельности, в т.ч. демонтаж и утилизацию.

Институтом Гидравлики (Hydraulic Institute, USA) в 2000 году было подготовлено руководство для анализа жизненного цикла энергетического оборудования, согласно которому в общем виде стоимость жизненного цикла энергетического оборудования *LCC* может быть описана следующим соотношением:

$$LCC = C_{IC} + C_{IN} + C_E + C_O + C_M + C_S + C_{ENV} + C_D, \quad (4.1)$$

где *LCC* – стоимость жизненного цикла; C_{IC} – начальные затраты (цена приобретения оборудования с сопутствующими принадлежностями); C_{IN} – затраты на монтаж оборудования и ввод в эксплуатацию (включая пуско-наладку и обучение персонала); C_E – затраты на электроэнергию; C_O – операционные затраты (затраты на оплату персонала, обеспечивающего текущее обслуживание системы); C_M – затраты на сервисное обслуживание и ремонт (регулярный сервис и плановый ремонт); C_S – затраты на непроизводственные потери (простои оборудования вне эксплуатации); C_{ENV} – затраты на экологию (устранение последствий загрязнения от работы основного и вспомогательного оборудования); C_D – затраты на списание и утилизацию (включая восстановление местной окружающей среды и ликвидацию вспомогательного оборудования).

Начальные затраты, цена приобретения (C_{ic}). При выборе проектной схемы системы принимается целый ряд решений, определяющих начальную стоимость проекта. Начальные затраты также включают в себя затраты на инжиниринг (проект, чертежи, решений по управлению и регулированию), на работу с поставщиками/подрядчиками, на приемочные испытания и осмотр, на определение состава и заказ запасных частей, на начальную подготовку персонала и др.

Стоимость монтажа и ввода в эксплуатацию (C_{in}) включают затраты на установку оборудования и его подсоединение, на электрическое подключение и подключение КИПиА, на подключение вспомогательных систем и другого оборудования, на первоначальный пуск, на определение работоспособности и ввод в эксплуатацию.

Работы по монтажу и вводу в эксплуатацию заканчиваются после контрольного испытания, подтверждающего заданные параметры, передачей действующего оборудования и требований по обслуживанию (в ходе начального обучения) персоналу, ответственному за эксплуатацию системы.

Цена приобретения C_{ic} и стоимость монтажа C_{in} относятся к так называемым первоначальным затратам или, иначе, затратам капитального характера, т.е. определяют ту сумму инвестиционных средств, о ближайшем расходовании которых напрямую принимается решение при выборе варианта. К сожалению, до сегодняшнего дня при принятии решений в основном учитываются именно эти – первоначальные (капитальные) – затраты.

Информация о размере эксплуатационных затрат зачастую принимается во внимание как дополнительная, носит приблизительный характер, степень ее важности нередко оценивается интуитивно. В отличие от этого подхода анализ *LCC* требует детальной оценки эксплуатационных затрат альтернативных систем.

Для большинства систем отопления затраты на потребляемую за срок службы энергию и затраты обслуживания весьма высоки. Предваряя детальную оценку, следует определить текущую стоимость энергии (энергетических ресурсов), предполагаемый ежегодный рост цен на нее в течение предполагаемого срока эксплуатации, ожидаемую стоимость рабочей силы для обслуживания в эксплуатации, а также затраты сервисного и ремонтного характера.

Затраты на энергию (C_e), расходуемую в ходе эксплуатации систем теплоснабжения, являются, как правило, самым большим элементом эксплуатационных затрат в ходе жизненного цикла.

Операционные затраты, затраты на оплату постоянного обслуживающего персонала (C_o) в рамках современного подхода имеют две разнонаправленные тенденции: с одной стороны, удорожание рабочей силы при росте уровня квалификации персонала (в силу возрастающей технической сложности оборудования), с другой стороны, значительное сокращение численности персонала из-за повышения степени автоматизации и уровня надежности оборудования, арматуры и автоматики, а также снижения объемов работ контрольного характера за счет внедрения современных средств диспетчеризации и передачи данных в пределах SCADA-систем коммунальных предприятий.

Затраты на регулярный сервис и плановый ремонт (C_M) следует рассматривать подробнее особенно в случаях, когда по какому-либо из подлежащих оценке вариантов по условиям гарантии такой сервис должен быть обеспечен контрактом ("законтрактован") и запасными частями для обеспечения резерва на случай чрезвычайного ремонта. Для учета реального уровня затрат на сервис сравнение должно выполняться на сопоставимом основании в части условий надежности. При условии обслуживания только специальным сервисным субъектом именно его стоимость будет учтена при оценке этого варианта, в остальных вариантах должны быть учтены (на том же уровне обеспечения) стандартные способы обслуживания и приобретения запасных частей.

Другие элементы затрат в ходе эксплуатации, типа затрат на непроизводственные потери, простои оборудования (C_s), затрат на экологию (C_{ENV}), а также затраты на прекращение деятельности, включая стоимость демонтажа, списания и утилизации (C_D), как правило,

значительно меньше рассмотренных выше затрат и часто могут оцениваться на основе имеющихся фактических данных для аналогичных систем.

Осознавая широту и многообразие всего набора факторов, учитываемых при определении стоимости жизненного цикла систем теплоснабжения (начиная от первоначальных затрат и заканчивая процентной ставкой), отметим, что уровни значимости факторов при поиске оптимального решения в задачах проектирования сильно отличаются.

Наиболее значимый вклад в стоимость жизненного цикла вносят затраты на энергию (энергоресурсы) и обслуживание (обобщенное для всего спектра энергетических систем распределение затрат в соответствии с исследованиями Hydraulic Institute представлено на рис. 6).

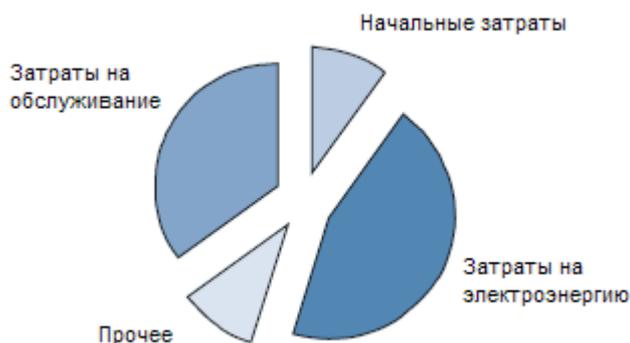


Рисунок 6. Распределение вклада различных факторов в стоимость жизненного цикла систем теплоснабжения при расчетном сроке эксплуатации систем в 20 лет

Для автономных систем теплоснабжения работающих в полуавтоматическом режиме в силу отсутствия постоянного обслуживания и большого объема наработки компрессорного, насосного, теплообменного оборудования (более 2000 часов в год) распределение еще больше сдвигается в сторону преобладания энергетических затрат. Это позволяет в первом приближении оценивать общую эффективность решения на основании уровня его энергоэффективности.

Для сравнения целесообразности отдельных схем теплоснабжения могут быть использованы различные показатели экономической эффективности инвестиционных проектов: чистый дисконтируемый доход (интегральный эффект, чистый приведенный доход, чистая текущая стоимость и т.д.); индекс доходности (рентабельности) инвестиций; срок окупаемости инвестиций; внутренняя норма доходности; годовой эффект инвестиционного проекта за расчетный период; совокупные дисконтированные затраты за расчетный период.

Отдавая должное информативности и функциональности названных здесь показателей, отметим, что все они, кроме последнего, реализуют метод сопоставления инвестиций с получаемым доходом. Это делает их наилучшими для оценки инвестиционных проектов, сопровождающихся снижением текущих издержек и приростом прибыли. Принимая эти показатели как дополнительные при оценке части из рассматриваемых проектов теплоснабжения, считаем целесообразным для рассматриваемой задачи в качестве основного

и универсального применять критерий минимизации совокупных дисконтированных затрат за расчетный период.

Это обусловлено тем, что энергосберегающие проекты во многих случаях относятся к группе, так называемых, "затратных" проектов, прямым предназначением которых не является получения прибыли.

Для "затратных" инвестиционных проектов (при выборе экономичного оборудования, анализе проектов энерго- и ресурсосбережения) задача сводится к выбору варианта, который будет сопряжен с наименьшими дисконтированными затратами за расчетный период.

Расчетный период принимается с учетом продолжительности создания, эксплуатации и (при необходимости) ликвидации объекта.

При определении срока эксплуатации оборудования или объекта различают *экономический срок эксплуатации* (время морального старения, после которого экономически целесообразно провести замену оборудования) и *технический срок эксплуатации* (время физического износа, т.е. физически возможный срок эксплуатации объекта инвестиций). При проведении анализа в рамках модели *LCC* целесообразно использовать экономический срок эксплуатации.

Системы теплоснабжения имеют продолжительность эксплуатации 15 – 20 лет. В рамках анализа продолжительность эксплуатации может быть принята на основании нормативного срока эксплуатации основного технологического оборудования – теплообменного, компрессорного и насосного оборудования. Согласно руководству рекомендуется в расчетах срок службы компрессорного и насосного оборудования приравнять 8 годам, что соответствует среднему значению экономического срока эксплуатации (срока до морального износа) и для данного типа оборудования корреспондируется с амортизационными нормами.

Используя дисконтирование затрат в составе формулы (4.1), определим совокупные дисконтированные затраты за жизненный цикл оборудования:

$$LCCD = C_{IC} + C_{IN} + \sum_{t=1}^{T_{cl}} \frac{C_E(t) + C_O(t) + C_M(t) + C_S(t) + C_{ENV}(t)}{(1+r)^t} + \frac{C_D}{(1+r)^{T_{cl}}}, \quad (4.2)$$

где *LCCD* – совокупные дисконтированные затраты за жизненный цикл оборудования; *t* – текущий шаг расчетного периода (год или месяц); *T_{cl}* – срок службы; *r* – расчетная норма дисконта, *C_E(t) + C_O(t) + C_M(t) + C_S(t) + C_{ENV}(t)* – сумма шаговых эксплуатационных затрат (понесенных в течение текущего шага *t*), по составу соответствующих представленным в (5.1).

В рамках данного определения для стандартизации и простоты предполагаем, что капитальные вложения (затраты инвестиционного характера в составе *C_{IC}* и *C_{IN}*) осуществляются однократно в нулевой точке, совпадающей с началом 1-го шага эксплуатации, все эксплуатационные затраты любого из шагов (года) смещены к концу этого шага (года), затраты на ликвидацию заказчик несет в конце последнего (*T_{cl}*) шага (года) эксплуатации. Безусловно, при необходимости, связанной с характером задачи и порядком несения затрат, определение шагов и событий в пределах расчетного периода может быть изменено.

Норма дисконта r – норма, используемая при дисконтировании затрат в модели вследствие существования временного предпочтения или положительной ставки процента. В общем плане r играет роль базового уровня, в сравнении с которым оценивается экономическая эффективность варианта проекта.

При общих экономически обоснованных подходах расчетная норма дисконта задается в качестве основного экономического норматива интервально. Нижняя оценка определяется уровнем банковских процентов по депозитам и по заемным средствам (долгосрочные кредиты), а также соотношением собственных и заемных средств при финансировании проекта. Верхний предел нормы дисконта определяется так называемой внутренней нормой доходности и равен максимальному проценту, под который можно взять кредит (для инвестирования проекта только за счет заемных средств), чтобы иметь возможность расплатиться за него за счет доходов (экономии затрат) при реализации проекта.

С учетом "затратного" характера решаемых нами задач и при отсутствии стоимостной оценки полезных результатов числовое значение нормы дисконта в расчетах с дисконтированием ориентировано на величину ставки рефинансирования Центрального Банка России (как некую заданную оценку стоимости используемого капитала).

Принимая такое назначения расчетной нормы дисконта, рассмотрим способы определения остальных величин в формуле 4.2.

Составляющие жизненного цикла можно оценить, располагая информацией об основном технологическом оборудовании канализационных очистных сооружений.

Затраты на энергии определяются через установленную мощность оборудования (N).

Что касается затрат на обслуживающий персонал, сервис и запасные части, то согласно Hydraulic Institute [28] их величина не превышает 75% затрат на электроэнергию. Однако для автономных систем теплоснабжения эти затраты несколько меньше. С целью исключения завышения эксплуатационных затрат примем их на уровне 50% от стоимости затрат на энергию.

Первоначальные затраты связаны в основном с покупкой основного и вспомогательного оборудования.

Таким образом, для некоторого проектного решения, предполагая ежегодное 10%-ное удорожание энергоресурсов и других текущих эксплуатационных затрат по годам расчетного 8-летнего периода, пренебрегая затратами на простой и ликвидацию, экспресс-оценка стоимости его жизненного цикла (без дисконта) дается соотношением вида:

$$LCC = C_{IC} + C_{IN} + (1.5 \times (N \times 24 \times 365 \times z_N \times 1.5)) \times 8, \quad (4.3)$$

где z_N – стоимость энергии, рублей за 1 кВт/час.

Дисконтированные затраты для сравнения вариантов можно определить в первом приближении по формуле:

$$LCCD = C_{IC} + C_{IN} + (1.5 \times (N \times 24 \times 365 \times z_N \times 1.5)) \times \alpha_T, \quad (4.4)$$

где α_T – коэффициент дисконта, определяемый по формуле:

$$\alpha_T = \sum_{t=1}^8 \frac{1}{(1+r)^t}, \quad (4.5)$$

и, таким образом, для случая ставки ЦБ РФ 10% ($r = 0,10$) $\alpha_T = 5,335$.

Не спекулируя здесь на прогнозах роста стоимости тарифов и изменения ставки рефинансирования, примем, что на протяжении расчетного срока они будут примерно равны (10%), а значит в расчетах друг друга компенсируют.

Результаты расчета по модели (4.4) для вариантов теплоснабжения жилого дома №15 при тарифах на электроэнергию, сжиженный газ с использованием данных заказчика представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Параметры	Автономная котельная на сжиженном газе	Теплоснабжение на базе теплового насоса
Затраты на покупку и монтаж оборудования $C_{IC} + C_{IN}$, рублей	792 000	896 000 (с учетом бурения на скале!)
Цена z_N за 1 кВт · час	2.5	5.95 / 3.5 = 1.7
Расчетная мощность отопительной системы, кВт	10	10
Средняя потребляемая мощность отопительной системы N , кВт	4.36 x 232 / 365 = 2.77	4.36 x 232 / 365 = 2.77
Стоимость жизненного цикла $LCCD$, рублей	792000 + 1.5 x (2.77 x 24 x 365 x 2.5 x 1.50) x 5.335 = 1520183	896 000 + 1.5 x (2.77 x 24 x 365 x 1.7 x 1.5) x 5.335 = 1391165

Очевидно, что даже при средних тарифах на сжиженный газ и чрезмерно больших тарифах на электроэнергию стоимость 8-ми летнего жизненного цикла систем с использованием тепловых насосов более чем на 8% ниже стоимости жизненного цикла систем со сжиженным газом.

Сказанное иллюстрирует рисунок 7. Пересечение линий, характеризующих стоимость жизненного цикла систем, следует воспринимать как тот период, за пределами которого использование более затратной по капитальным затратам системы становится экономически выгодным за счет более низких эксплуатационных затрат.

В данном случае существенно, что заказчиком приобретено газовое оборудование сегмента «элит», капитальные затраты на которое сопоставимы с приобретением теплового насоса с бурением на скале. Безусловно, можно существенно сократить капитальные затраты на приобретение газового оборудования (сегмент «эконом»), но тогда существенно возрастут эксплуатационные затраты на его обслуживание и контроль безопасности.

Расчет произведен для заведомо «невыгодных» для теплового насоса условий: крайне высокий тариф на электроэнергию и необходимость бурения скважин на скальном грунту.

В этой связи интересным будет рассмотреть конкурентоспособность ТН для иных условий, которые можно достигнуть на рассматриваемой строительной площадке. Результаты соответствующих расчетов представлены на рисунках 8 – 10.

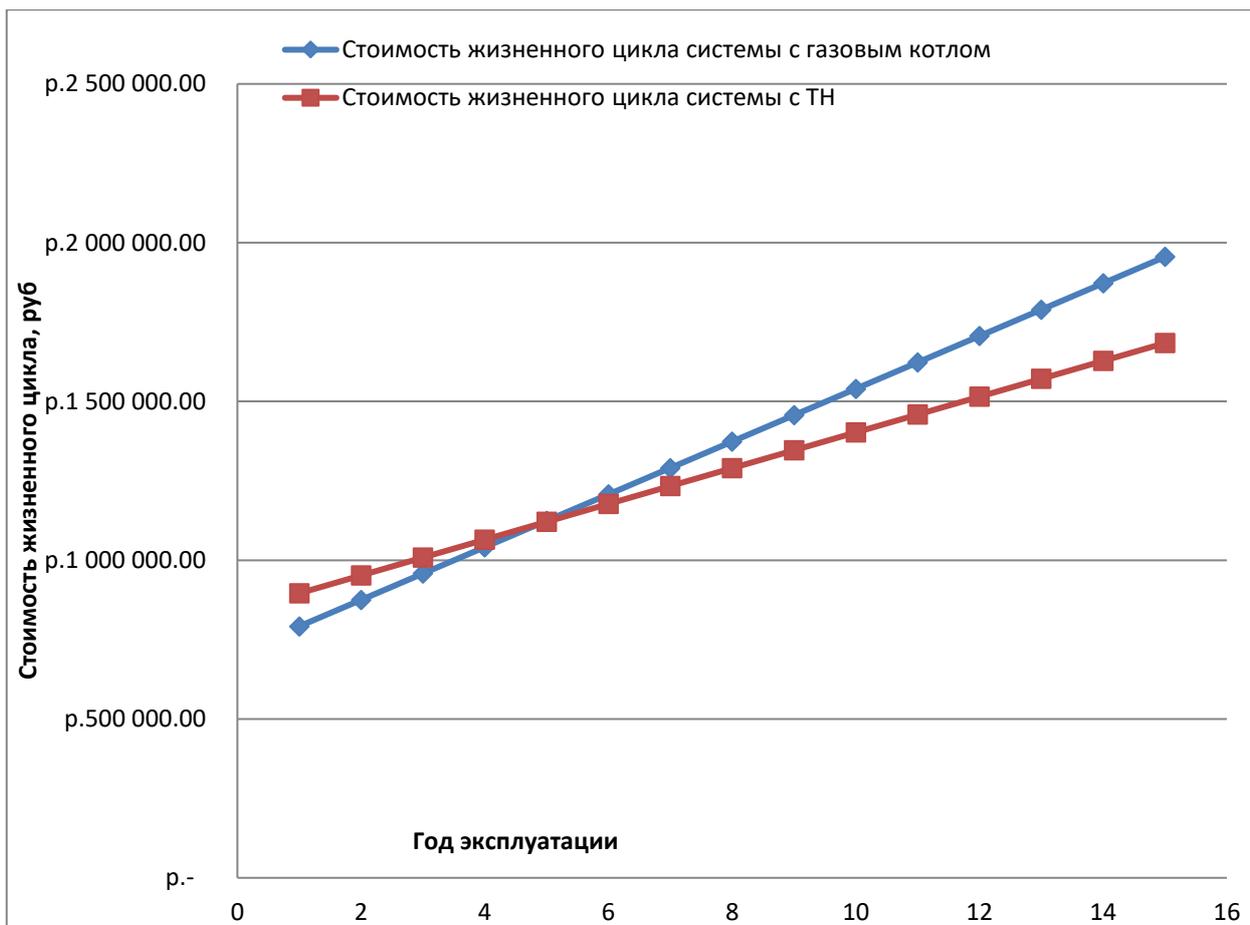


Рисунок 7. Кривые стоимости жизненного цикла отопительных систем с газовой котельной на сжиженном топливе и теплового насоса: стоимость газа – 18.3 рубля за литр, 1 кВт-час – 5.95 рубля, бурение на скальных грунтах, «теплая зима» со средними теплотерями 4.36 кВт-час



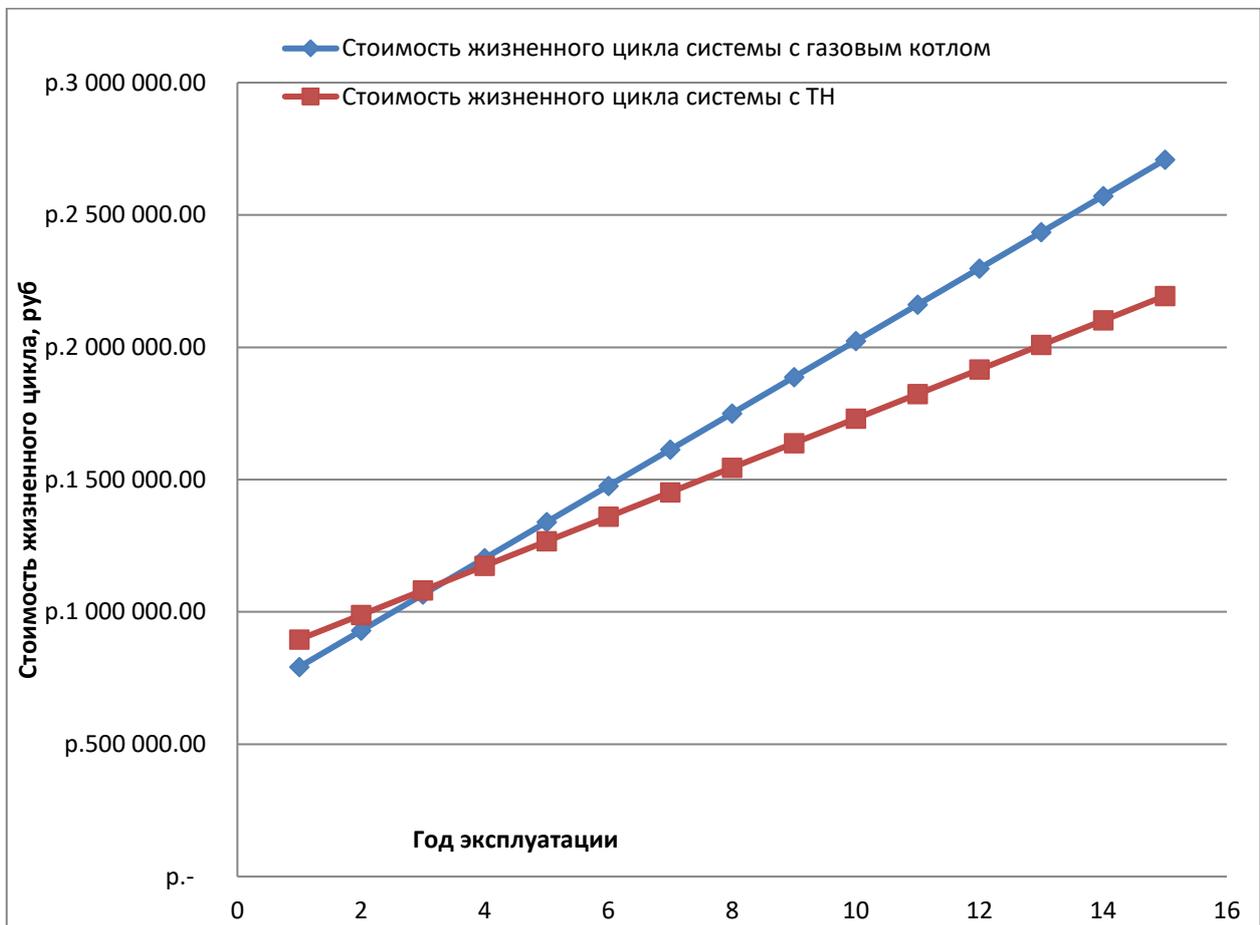
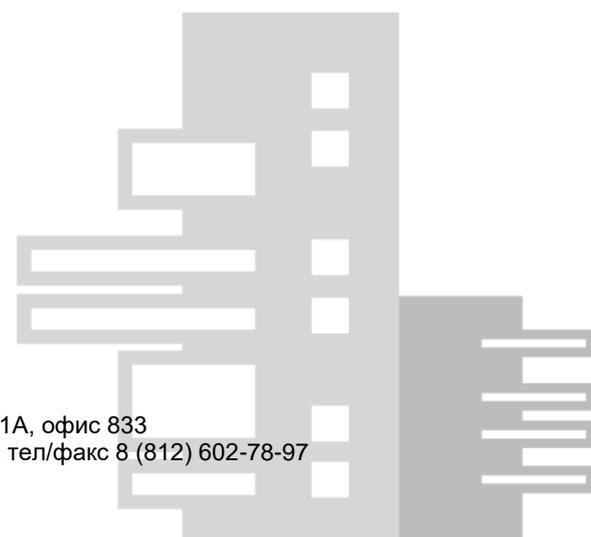


Рисунок 8. Кривые стоимости жизненного цикла отопительных систем с газовой котельной на сжиженном топливе и теплового насоса: стоимость газа – 18.3 рубля за литр, 1 кВт-час – 5.95 рубля, бурение на скальных грунтах, «холодная зима» со средними теплопотерями 7.5 кВт-час

Сравнивая рисунки 7 и 8, можно сделать вывод, что при росте средней нагрузке на отопление (при сохранении максимально возможной отопительной нагрузке) эффективность ТН растет. Иначе говоря, если система отопления с использованием ТН работает при тепловых нагрузках близких к максимальной производительности ТН, то такая система более эффективна, чем та, где максимальные и средние нагрузки сильно отличаются.



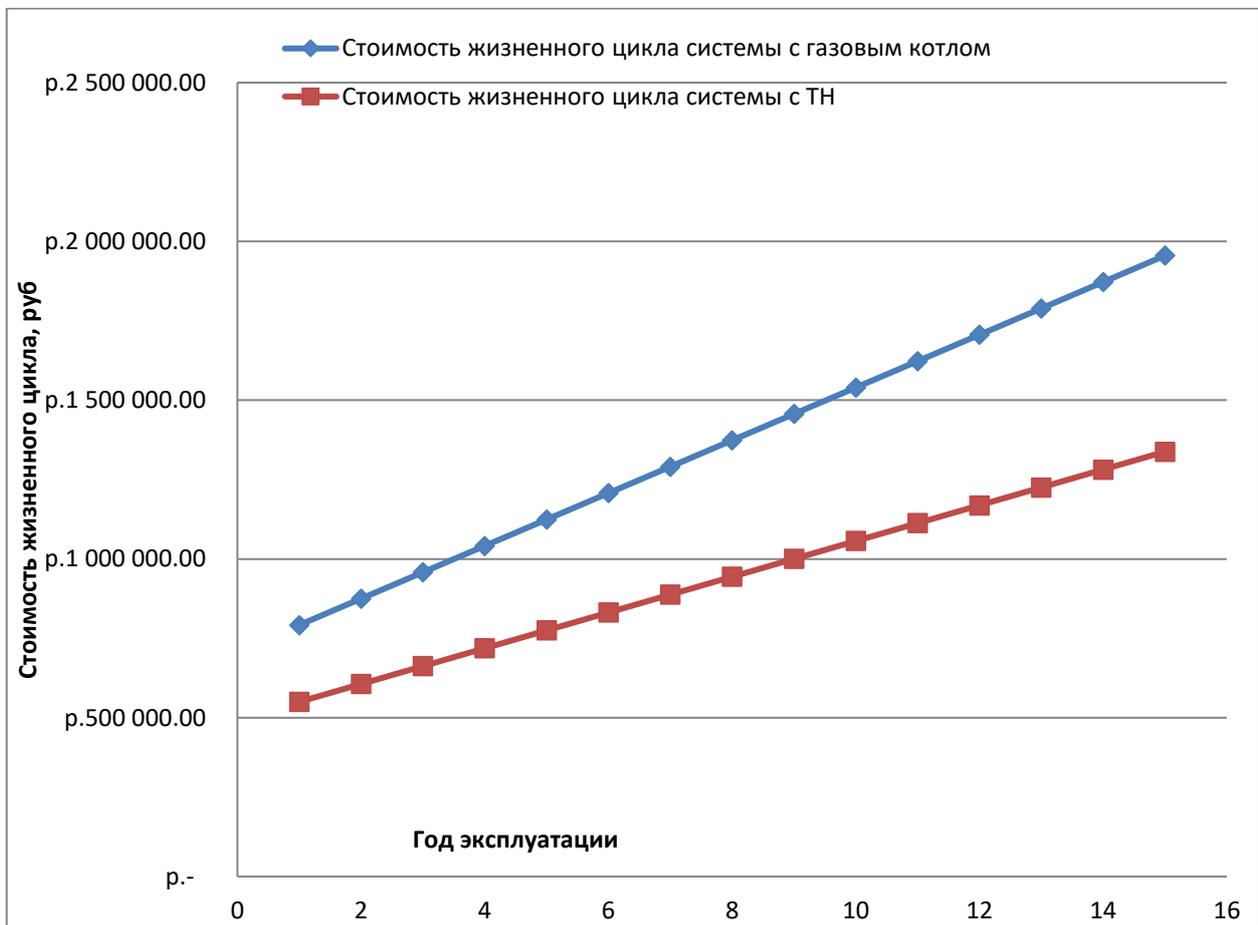
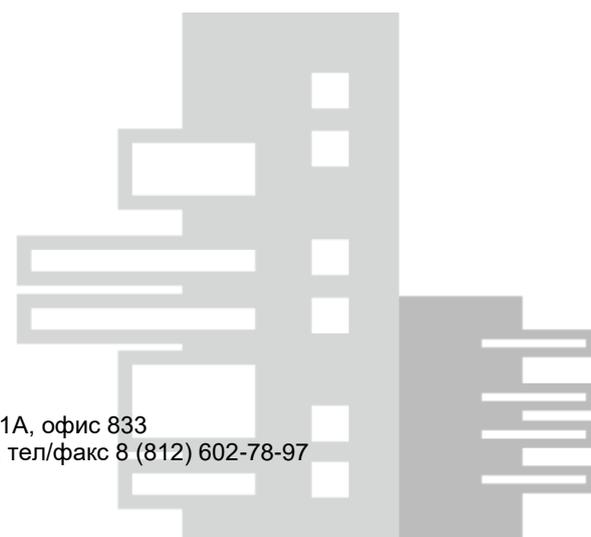


Рисунок 9. Кривые стоимости жизненного цикла отопительных систем с газовой котельной на сжиженном топливе и теплового насоса: стоимость газа – 18.3 рублей за литр, 1 кВт-час – 5.95 рубля (тариф ИЖС в г. Сортавала), бурение на нескальный грунт, «холодная зима» со средними теплопотерями 7.5 кВт-час



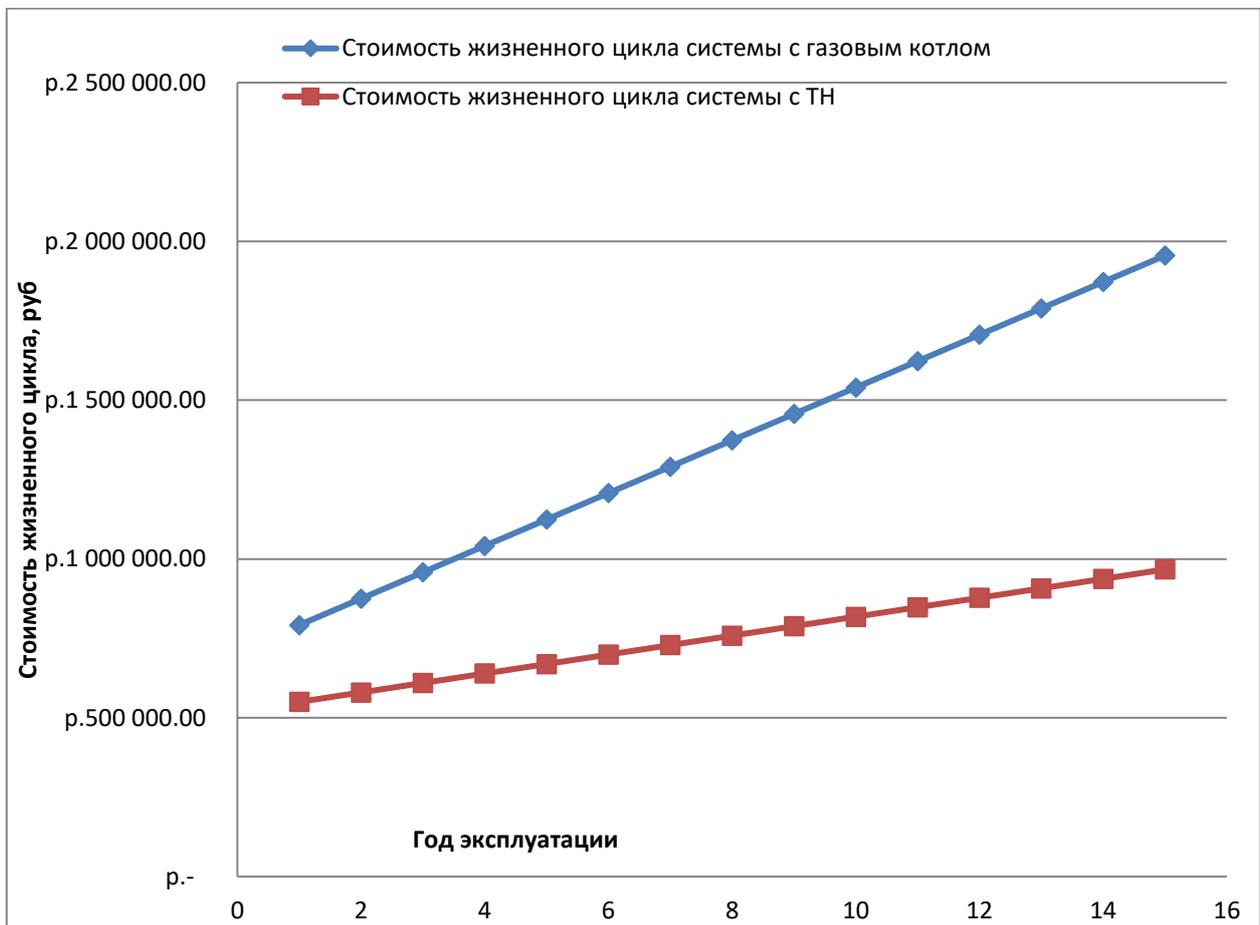


Рисунок 10. Кривые стоимости жизненного цикла отопительных систем с газовой котельной на сжиженном топливе и теплового насоса: стоимость газа – 18.3 рублей за литр, 1 кВт-час – 3.15 рубля (тариф ИЖС в г. Сортавала), бурение на нескальный грунт, «холодная зима» со средними теплопотерями 7.5 кВт-час

В условиях нескального бурения (рисунок 9) кривые жизненного цикла не пересекаются - в данном случае использование ТН изначально выгодно (капитальные затраты на реализацию ТН ниже капитальных затрат на создание газовой системы теплоснабжения), ситуация «усугубляется» при использовании тарифа на электроэнергию для ИЖС (см. рисунок 10).

В целом можно констатировать, что для объектов категории «элит» использование ТН даже в условиях высоких тарифов на энергоресурсы и сложных геологических ресурсах является целесообразным. Для рассматриваемого объекта (апарт-отель) использование газового оборудования категории «эконом» неприемлемо по причине недопустимого снижения уровня безопасности и комфорта объекта.

Для объектов «эконом» целесообразность использования технологии ТН необходимо обосновывать в каждом случае отдельно технико-экономическими расчетами.

7. Выводы

Экономическая выгода использования технологии ТН для отопления жилого дома №15 в большей степени определяется соотношением тарифов на энергоресурсы (электроэнергию и сжиженный газ).

При текущих тарифах на газ – от 18 рублей за литр сжиженного газа и 5.95 рублей за кВт-час по электроэнергии –, прогнозируемом росте тарифов на 10% в год и сохраняющейся базовой ставки на уровне 8-10% использование ТН экономически оправдано. Для конкретного объекта (жилого дома №15) срок эксплуатации системы с ТН для отопления дома, при котором она станет более экономически привлекательной, чем система с котельной на сжиженном газе, составляет от 0 до 5.

При использовании ТН также в качестве источника холодного воздуха в летний период срок получения экономической выгоды по оценкам Гершковича В.Ф. можно сократить еще на 40%.

В качестве дестабилизирующих факторов, которые могут негативно отразиться на экономическом эффекте при внедрении ТН, отметим следующие:

- Снижение уровня тепловой защиты жилого дома (согласно проектных решений удельная тепловая нагрузка на трансмиссионные теплопотери составляет около 40 Вт/м²) вследствие уменьшения толщины утеплителя и рост потребления тепла зданием вследствие ментальных особенностей клиентов апартаментов (при проветривании комнат в режиме «открытого» окна инфильтрационная компонента тепловых потерь может вести себя непредсказуемо и повысить кратно потребности в тепле),
- Подключение Заказчика к системе электроснабжения по тарифам для юридических лиц значительно девальвирует экономическую привлекательность систем с ТН (тарифы для ЮЛ в Карелии самые высокие в стране),
- Невозможность использования наиболее эффективной в части общего КПД системы воздушного отопления совмещенной с системой кондиционирования в доме №15, поскольку это требует полной переработки планировочных и дизайнерских решений,
- Ограничения на использование систем автоматического управления (существующие системы отопления на базе ТН не позволяют решать задачи глубокой автоматизации – как в домах №19 и №20 – или будут чрезмерно затратными),
- Дефицит технической информации по режиму работы ТН при нагрузках, отличающихся от максимальных, отсутствие данных по тепломеханическим свойствам грунтов в условиях нестационарного переноса тепла не позволяют получить точную информацию о сроках окупаемости инвестиций на этапе проектного расчета.

Структура распределения капитальных затрат для устройства ТН для дома №15 с проектным уровнем тепловой защиты (трансмиссионные теплопотери около 40 Вт/м²) без накладных затрат приведена ниже.

№	Оборудование и материалы	Кол-во	Цена	Сумма
Внутренний контур				
1	Тепловой насос BROSK Mark II 100	1	278 000 р.	278 000 р.
2	Гидравлический распределитель	1	25 800 р.	25 800 р.
3	Насосная группа	1	32 900 р.	32 900 р.
4	Группа безопасности	2	2 500 р.	5 000 р.
5	Трубные фасонные части комплект	1	9 000 р.	9 000 р.
6	Расширительный бак	1	2 000 р.	2 000 р.
7	Монтажные и пуско-наладочные работы	1	19 000 р.	19 000 р.
Внешний контур				
8	Бурение скважин с закладкой зондов, кВт*	9,3	5 914 р.	55 000 р.
9	Зонд BROSK U, кВт*	9,3	8 889 р.	82 665 р.
10	Утеплитель зондов	1	6 000 р.	6 000 р.
11	Горизонтальная разработка грунта	1	3 000 р.	3 000 р.
12	Коллектор приёмно-возвратный	1	14 400 р.	14 400 р.
13	Монтажные работы	1	24 000 р.	24 000 р.
Итого				556 765 р.

Позиция «бурение скважин» указана для условий бурения в нескальных породах, в конкретном случае стоимость бурения может увеличиться до 200 000 рублей.

Предварительная стоимость приобретения и установки ТН «под ключ» для дома №15 составляет 896 000 рублей.

Справочно: Для теплоснабжения 5 одинаковых домов (по типу №15) можно использовать групповую установку, стоимость покупки и монтажа которой будет в 3 раза больше одиночной (сокращение капитальных затрат на 30-40%).

Структура распределения капитальных затрат для устройства ТН для дома №15 с расчетной нагрузкой на систему отопления в 15 кВт приведена ниже.

$$K = 30.228 \cdot 15000 + 284966 = 738386 \text{ рублей}$$

$$\text{Поправка на бурение «на скалу»}: 375000 - 0.1 \cdot 738386 + 738386 = 1039547 \text{ рублей}$$

Итого - 1039537 рублей.

В этом случае кривые жизненного цикла будут следующими



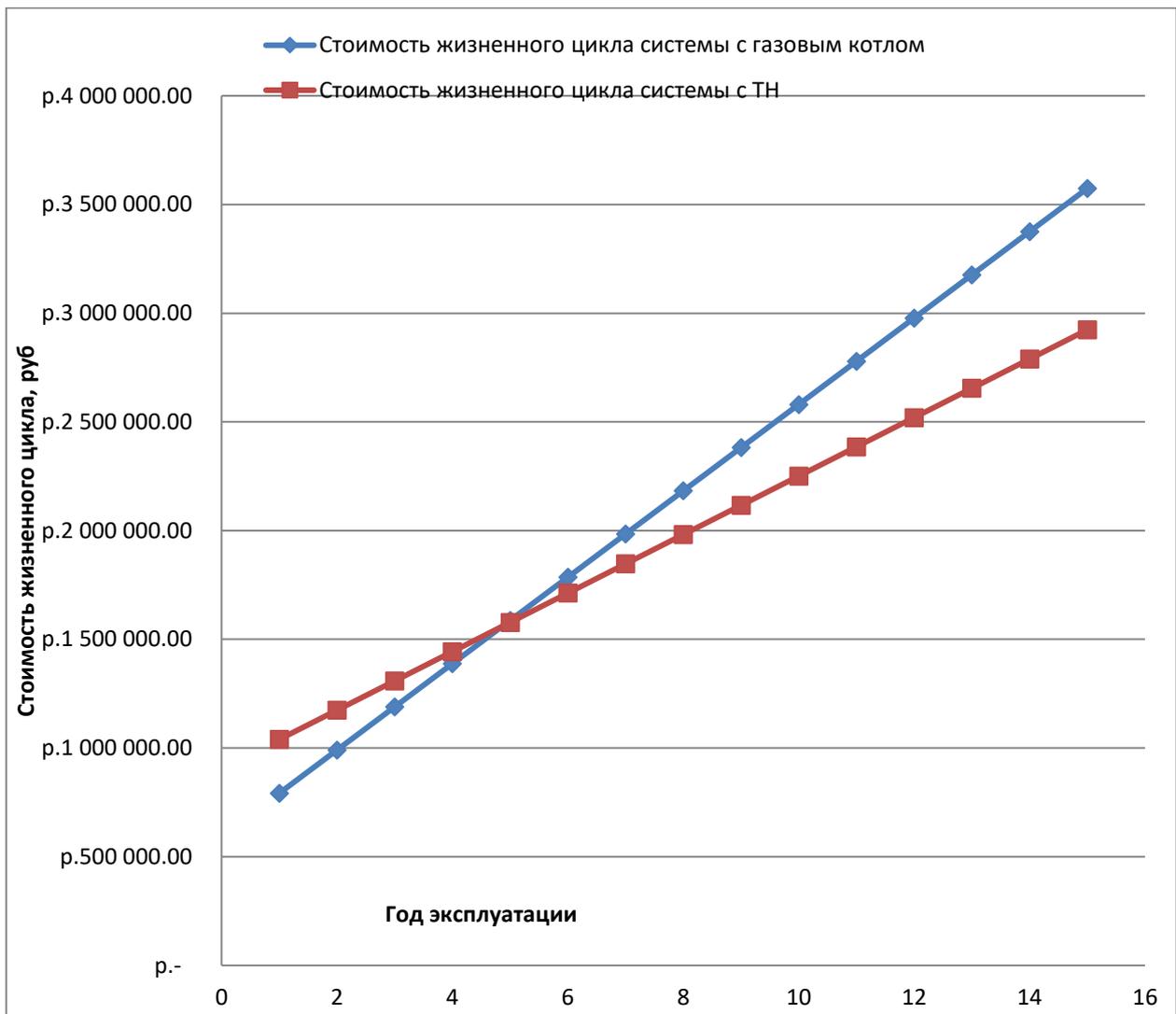
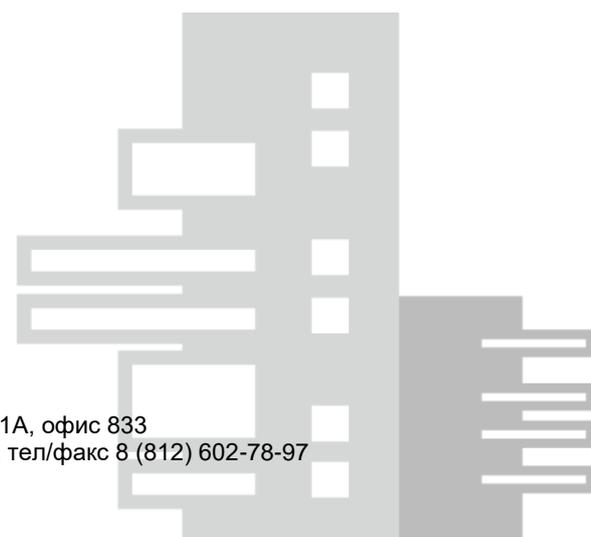


Рисунок 11. Кривые стоимости жизненного цикла отопительных систем с газовой котельной на сжиженном топливе и теплового насоса (15 кВт): стоимость газа – 18.3 рублей за литр, 1 кВт-час – 3.15 рубля (тариф ИЖС в г. Сортавала), бурение на скальный грунт, «холодная зима» со средними теплопотерями 10 кВт-час, кондиционирования нет



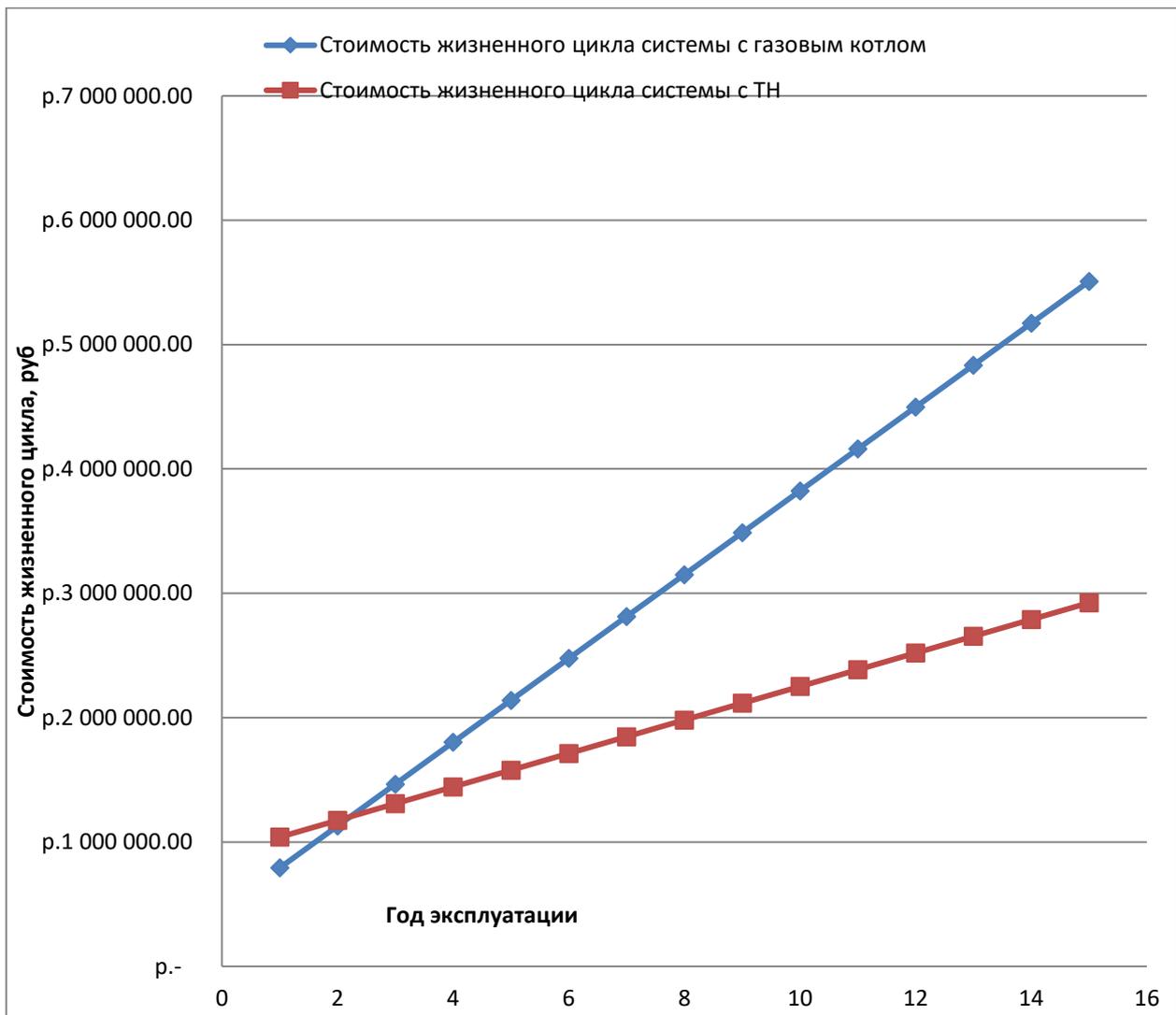


Рисунок 12. Кривые стоимости жизненного цикла отопительных систем с газовой котельной на сжиженном топливе и теплового насоса (15 кВт): стоимость газа – 18.3 рублей за литр, 1 кВт-час – 3.15 рубля (тариф ИЖС в г. Сортавала), бурение на скальный грунт, «холодная зима» со средними теплопотерями 10 кВт-час, кондиционирование есть

