

ПРООН/ГЭФ
Проект №00077154 «Повышение энергетической эффективности жилых
зданий в Республике Беларусь»

**ПРЕДПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕСТНОГО ИСТОЧНИКА ОТОПЛЕНИЯ
И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЖИЛОГО ДОМА
В Г. МОГИЛЕВЕ**

Исполнитель,

Эксперт по вопросам внедрения
тепловых насосов в системах
теплоснабжения и горячего
водоснабжения в жилом секторе

_____ И.С.Жидович

Минск
ноябрь 2014

1 ЦЕЛЕВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО МНОГОКВАРТИРНОГО ПИЛОТНОГО ЖИЛОГО ДОМА КАК ПОТРЕБИТЕЛЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ.....	3
1.1 Условия размещения энергоэффективного жилого дома.....	3
1.2 Параметры местных источников низкопотенциальной теплоты.....	5
1.3 Расчетные тепловые нагрузки и температуры систем отопления и горячего водоснабжения.....	9
2 ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТНЫХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ.....	11
2.1 Структурные схемы местных источников отопления и горячего водоснабжения	11
2.2 Расчет энергетических потоков в местных источниках отопления и горячего водоснабжения.....	16
2.3 Выбор тепловых насосов, возможных для применения в структуре местного источника горячего водоснабжения.....	23
3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ МЕСТНЫХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ.....	26
3.1 Энергетическое сравнение.....	26
3.2 Экологическое сравнение.....	27
3.3 Экономическое сравнение.....	28
4 РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕСТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПИЛОТНОГО ЖИЛОГО ДОМА.....	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	35
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	36

1 Целевая характеристика энергоэффективного многоквартирного пилотного жилого дома как потребителя тепловой энергии

1.1 Условия размещения энергоэффективного жилого дома

Проектируемый в г. Могилеве энергоэффективный пилотный жилой дом расположен по ул. Аркадия Кулешова жилого района «Спутник» (рис.1.1). Количество квартир – 160, число подъездов – 4, этажность – 10, общая площадь – 13400 м², ожидаемое число жителей при коэффициенте семейности 3.0¹ – 480 человек.

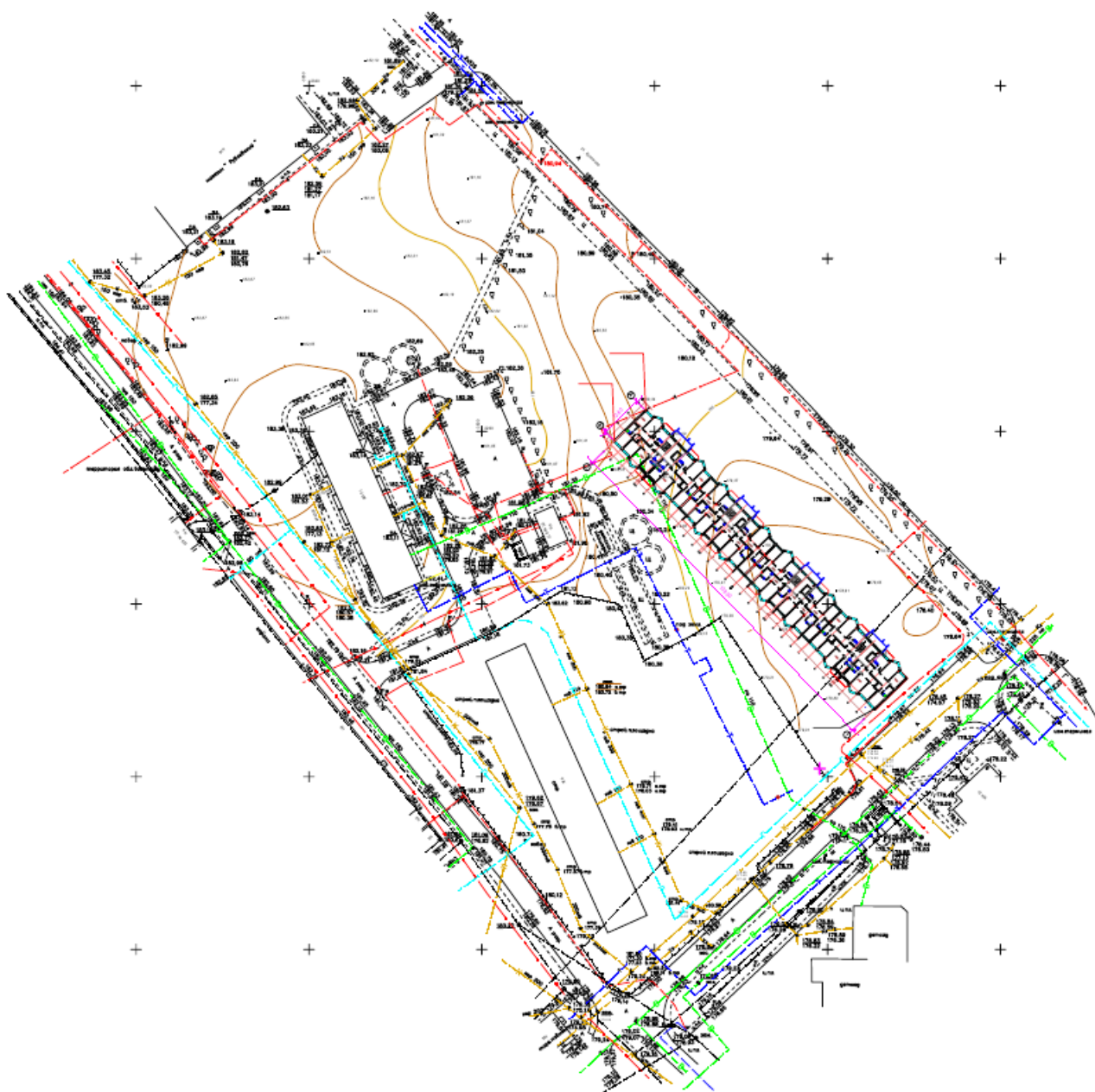


Рис. 1.1. – Фрагмент застройки жилого района с инженерными сетями

¹ Коэффициент семейности в жилом районе равен 2,88

Как видно из рис. 1.1 жилой дом располагается на территории микрорайона обеспеченного всеми инженерными системами. На расстояниях до 100 м от пятна застройки расположена трансформаторная п/ст 10/0,4 кВ, проложены внутриквартальные сети централизованного теплоснабжения, газопровода, водоснабжения и водоотведения, а по ул. Аркадия Кулешова (50 м от дома) – трубопровод d800 мм районной самотечной канализационной сети.

Источником теплоснабжения микрорайона является система централизованного теплоснабжения г.Могилева. Ближайший источник выработки тепловой и электрической энергии (около 750 м) – Могилевская ТЭЦ-1. В таблице 1.1 приведены значения основных технических показателей Могилевской ТЭЦ-1, которые планируется использовать в технико-экономических расчетах при обосновании структуры и производительности местных теплоисточников.

Таблица 1.1. – Значения основных технико-экономических показателей работы ТЭЦ-1 (данные РУП «Минскэнерго» от 22-23.10.2014г.)

Показатели	Единица измерений	Количество	
		2011 г.	По проекту реконструкции ТЭЦ-1 (БелТЭИ)
Установленная электрическая мощность	МВт	21,2	49,0
Установленная тепловая мощность	Гкал/час	304	296
Годовой отпуск электрической энергии	млн. кВт-ч	121,4	326,8
Годовой отпуск тепловой энергии	тыс. Гкал	763,3	
Удельный расход условного топлива:			
– на отпуск тепловой энергии	кг/Гкал	168,5	174,8
– на отпуск электрической энергии	г/кВт-ч	164,3	162,8
Годовой расход условного топлива	тыс. т у.т.	148,6	186,6
Себестоимость выработки (ср. за 9 месяцев 2014г.):			
– тепловой энергии	руб/Гкал долл./Гкал	405190,5 38,6
– электрической энергии	тыс.руб/МВт-ч долл./МВт-ч	689,8 65,7
Цена топлива (ср. за 9 месяцев 2014 г.)	руб/тыс.м ³ долл./т у.т.	1986995,0 166,0

1.2 Параметры местных источников низкопотенциальной теплоты

С учетом градостроительных условий в качестве источников низкопотенциальной теплоты (НПИТ) для тепловых насосов могут рассматриваться возобновляемые – энергия солнца, наружный воздух, грунт и антропогенные (вторичные) – бытовые и городские сточные воды.

Энергия солнца. Показатели солнечной энергии для условий г.Могилева, включая значения определяющих параметров солнечного сияния и солнечной радиации, приведены в [1].

За основу определения теплового потенциала солнечной энергии, который может быть получен при применении гелиоколлекторов, устанавливаемых на крыше пилотного жилого дома в г.Могилеве, приняты данные решения аналогичной задачи для жилого дома в г.Гродно [2]. Основанием такого подхода являются результаты сравнения природно-климатические данных для этих городов, расположенные на географической широте $53^{\circ}55'008''$ (г.Могилев) и $53^{\circ}41'18''$ (г.Гродно), характеризующихся практически одинаковыми месячными суммами прямой и суммарной солнечной радиации на горизонтальные и вертикальные поверхности, средней за год продолжительность солнечного сияния – 1783 часа и 1763 часа и средней за отопительный период продолжительностью солнечного сияния 4899 часов и 4850 часов.

В результате приведения к условно одинаковым конструктивным и планировочным условиям жилых домов в г.Гродно и г.Могилеве были определены значения главных показателей гелиосистемы, планируемой к применению в составе разрабатываемого источника отопления и горячего водоснабжения пилотного жилого дома в г.Могилеве:

- поверхность 192 гелиоколлекторов – 384 м^2 ;
- расчетная мощность гелиоколлекторов (зима/лето) – около 45/90 кВт;
- годовая теплопроизводительность гелиосистемы (зима/лето) – 71,81/174,7 МВтч.

Наружный воздух. Воздух является самым доступным местным источником низкопотенциальной энергии. Эффективность использования его теплового потенциала ограничена значительной амплитудой колебания температуры в течение суток, отопительного периода и года.

Основные показатели наружного воздуха в отопительный период года для условий г.Могилева, которые необходимо принимать как при оценке его как источника низкопотенциальной теплоты, так и в расчетах по выбору мощности теплогенерирующего оборудования, следующие [1, 3]:

- 1 Средняя температура воздуха наиболее холодной пятидневки – минус 24°C .
- 2 Средняя температура наиболее холодных суток – минус 26°C .
- 3 Средняя температура периода со средней суточной температурой воздуха $< 8^{\circ}\text{C}$ – минус $1,5^{\circ}\text{C}$.

- 4 Средняя месячная температура воздуха самого холодного месяца (январь) – минус $6,8^{\circ}\text{C}$.
- 5 Средняя суточная амплитуда температуры воздуха (разность между суточным максимумом и минимумом температуры):
 - в отопительный период (ноябрь-апрель) – от $4,5$ до $9,4^{\circ}\text{C}$;
 - в самый холодный месяц (январь) – около $6,3^{\circ}\text{C}$.
- 6 Число дней с оттепелью за декабрь-февраль – 44 дня.
- 7 Продолжительность отопительного периода со средней суточной температурой воздуха:
 - от минус $34,9^{\circ}\text{C}$ до $+8^{\circ}\text{C}$ – 4896 часов;
 - от $+8^{\circ}\text{C}$ до $0,1^{\circ}\text{C}$ – 2100 часов;
 - от 0°C до минус $4,9^{\circ}\text{C}$ – 1350 часов;
 - от минус 5°C до минус $9,9^{\circ}\text{C}$ – 770 часов;
 - от минус 10°C до минус $14,9^{\circ}\text{C}$ – 416 часов;
 - от минус 15°C до минус $24,9^{\circ}\text{C}$ – 242 часов;
 - от минус 25°C до минус $34,9^{\circ}\text{C}$ – 18 часов.
- 8 Средняя месячная относительная влажность за отопительный период – 84%.
- 9 Средняя месячная относительная влажность в 15 часов января – 82%.

Из приведенных данных видно, что с применением известного сегодня теплогенерирующего оборудования можно рассматривать использование теплоты наружного воздуха только в комбинации с другими видами НПИТ.

Грунт. Грунт является источником теплоты неограниченного ресурса. В условиях дефицита свободной от застройки и инженерных коммуникаций территории использование теплоты грунта возможно только с применением вертикальных теплообменников (зондов) закладываемых в скважины или залитых в сваи фундамента проектируемого жилого дома. Их эффективность зависит, главным образом, от температуры и состава грунта. Для проектирования эти параметры должны приниматься по результатам геотермального исследования площадки жилого дома.

В предпроектных расчетах учитывается только изменение температуры грунта по глубине. Характерно, что колебания температуры верхних слоев грунта (до 5м) запаздывают во времени относительно колебаний температуры наружного воздуха, т.е. существенно зависят от сезона года (рис. 1.2). До глубины 100 м отмечаются сравнительно низкие значения геотермического градиента (скорости нарастания температуры с увеличением глубины на 1 м), не превышающие 15 мК/м (милликельвин/метр).

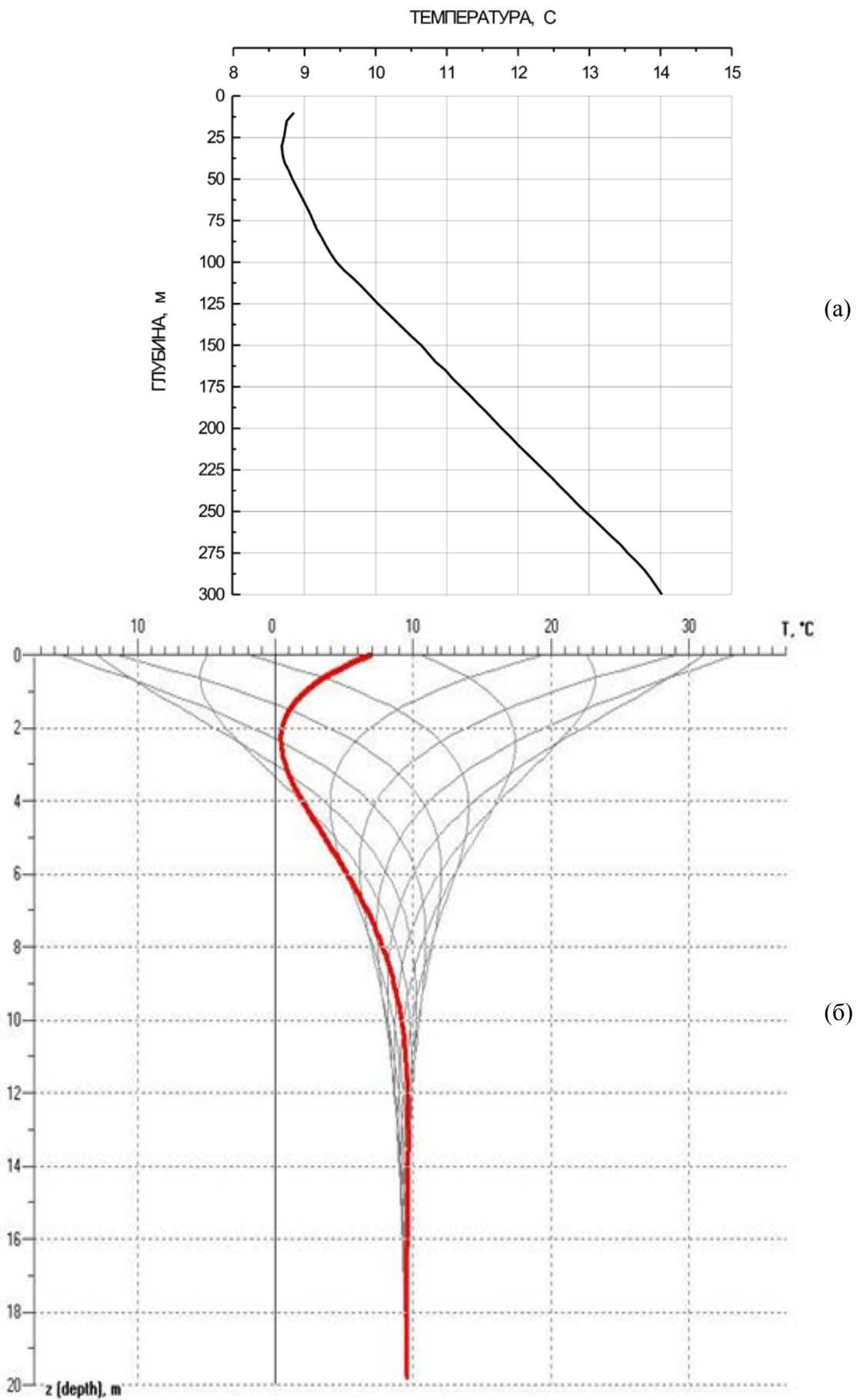


Рис. 1.2. – Типовые термограммы скважин: (а) - глубина до 300 м; (б) - глубина до 20 м

При применении теплообменников, залитых в сваях фундамента дома, их параметры определяются конструктивными особенностями свайного поля. Основными проблемами такой системы отбора теплоты грунта является вероятность захлаживания температурного поля свай при продолжительной работе тепловых насосов.

Сточные воды. Применительно к условиям расположения пилотного жилого дома можно рассматривать возможность использования сточных вод от двух источников.

Сточные воды от пилотного жилого дома. Расчетный объем сточных вод 81,6 м³/сутки со средней температурой около 26⁰С (при температуре холодной воды 8⁰С, горячей – 55⁰С). Объем сточных вод без туалетов (серых) оценивается в 67,2 м³/сутки со средней температурой около 30⁰С.

График отведения бытовых сточных вод в наружную канализационную сеть соответствует (с некоторым запозданием) графику водопотребления с характерными утренними и вечерними пиками и ночными провалами.

Средний суточный тепловой потенциал «серых» бытовых сточных вод при их охлаждении до 8⁰С составляет около 1,5 Гкал.

Производственные и бытовые сточные воды, отводимые по районному канализационному коллектору d800. Канализационный коллектор d800 проходит по ул. Аркадия Кулешова в 50 м от площадки застройки (см. рис.1.1). Напротив фронта дома (через дорогу) расположены два колодца (№30 и №31). Глубина прокладки от существующих отметок земли до лотка колодца № 30 - 5,3 м, колодца № 31 – 5,13 м. По предварительным данным технического отдела МГКУП «Горводоканал» (22-23.10.2014г.) расчетное наполнение на этом участке коллектора составляет 0,75d, а температура потока в периоды минимального наполнения – не ниже 12⁰С.

В таблице 1.2 приведены данные о значениях наполнения трубы диаметром 800 мм и соответствующие им величинам расхода сточных вод, скорости и площади живого сечения потока.

Таблица 1.2. – Гидравлические характеристики потока сточных вод в коллекторе d800

Наполнение (h/d), %	75	50	35	25	15
Расход, м ³ /час	4071,6	2233,1	1171,8	611,3	217,1
Скорость при уклоне 0,0102, м/сек	2,8	2,47	2,08	1,73	1,28
Площадь живого сечения потока, м ²	0,4044	0,2513	0,1568	0,0982	0,0473

По оценочным данным располагаемый тепловой потенциал городских сточных вод, отводимых по районному канализационному коллектору d800 даже в режиме минимального наполнения (h/d=0,15) при их охлаждении только на 2⁰С составляет около 500 кВт, что значительно превышает потребности в тепловой энергии пилотного жилого дома.

Системный анализ, выполненный с учетом результатов экспертной оценки по ранжированию рассмотренных местных источников низкопотенциальной теплоты по их энергетической и экономической эффективности, позволяет сделать вывод о целесообразности рассмотрения вариантов использования для отопления и горячего

водоснабжения теплоты:

- сточных вод – теплообменниками-утилизаторами и тепловыми насосами;
- энергии солнца – гелиоустановками и тепловыми насосами.

Использование теплоты грунта с применением скважинных теплообменников и теплообменников, залитых в сваях фундамента жилого дома, требует изучения их технических параметров и эффективности работы в ожидаемых условиях эксплуатации.

1.3 Расчетные тепловые нагрузки и температуры систем отопления и горячего водоснабжения

По рекомендации НИПТИС за основу в расчетах тепловой нагрузки энергоэффективного жилого дома (160 квартир, 4 подъезда, 10 этажей, общая площадь 13400 м², число жителей – 480 человек) приняты данные по тепловым нагрузкам энергоэффективного жилого дома в г.Гродно². С учетом разницы климатических условия определены следующие расчетные значения тепловой нагрузки:

- расчетная нагрузка отопления ($t_{p.} = \text{минус } 24^{\circ}\text{C}$, $t_{вн} = +18^{\circ}\text{C}$) – 155,0 кВт;
- суточное потребление воды с температурой 55°C ($t_{\text{хол.воды}} = +5^{\circ}\text{C}$) – 33,6 м³;
- средняя суточная/максимально-часовая нагрузка системы горячего водоснабжения в отопительный период ($t_{\text{хол.воды}} = +5^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{гор.воды}} = +55^{\circ}\text{C}$) – 81,4/179,1 кВт;
- средняя суточная/максимально-часовая нагрузка системы горячего водоснабжения в межотопительный период ($t_{\text{хол.воды}} = +10^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{гор.воды}} = +55^{\circ}\text{C}$) – 73,3/161,3 кВт.

Тепловая нагрузка на нагрев приточного воздуха принята равной нулю, т.к. планируется ее покрытие за счет утилизации теплоты вытяжного воздуха с применением электродоводчиков.

На основании известной зависимости, чем ниже температура теплоносителя на выходе тепловых насосов, тем выше экономичность их применения, принято целесообразным рассмотреть, как альтернативные, температурные графики системы отопления ($t_{p.} = \text{минус } 24^{\circ}\text{C}$) – 65/45⁰C и 55/35⁰C (рис. 1.3).

² - 10 этажей, три подъезда, 120 квартир общей площадью 9834 м², число жителей – 360 жителей, $t_{\text{нар.возд.}}^p = \text{минус } 22^{\circ}\text{C}$

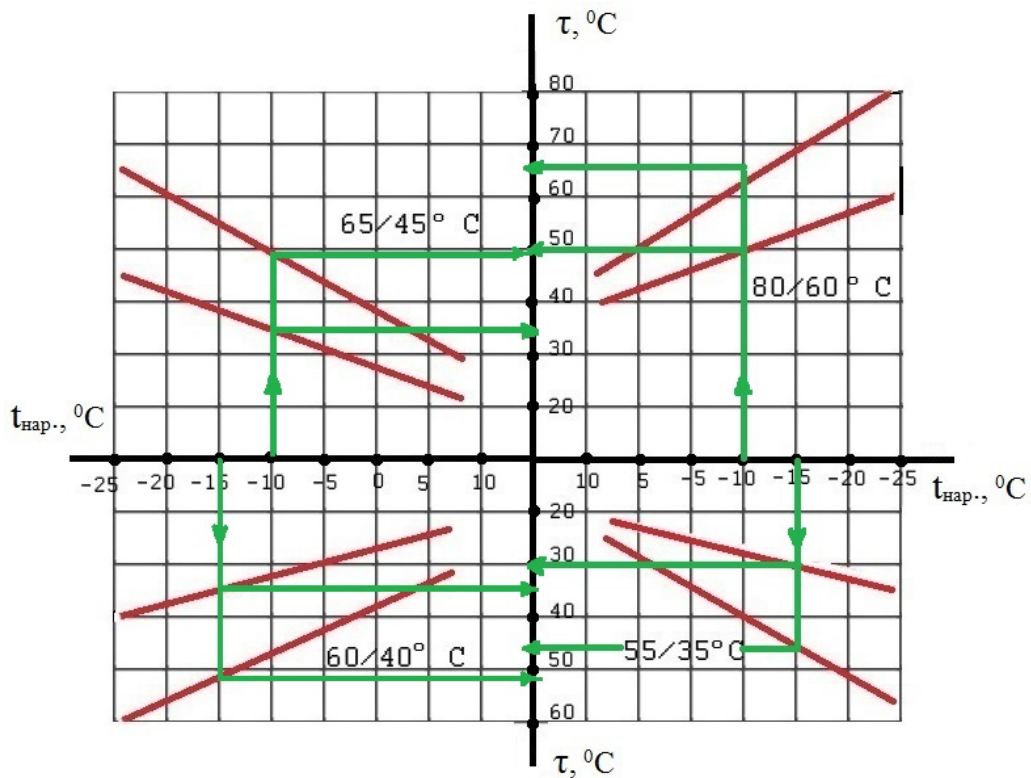


Рис. 1.3. – Альтернативные графики систем отопления плотного жилого дома

Для этих графиков температуре наружного воздуха минус 15°C соответствуют температуры $55/40^{\circ}\text{C}$ и $45/30^{\circ}\text{C}$, а минус 10°C – $50/35^{\circ}\text{C}$ и $40/27^{\circ}\text{C}$. Соответственно, при температуре минус 15°C отопительная нагрузка дома будет равна 121,8 кВт, а при температуре минус 10°C – 103,3 кВт.

Понятно, что при проектировании температурный график систем отопления жилого дома и температуры теплоносителей от тепловых насосов должны быть обоснованы стыкуемыми расчетами, т.к. чем ниже температура в сети отопления, тем выше экономичность применения тепловых насосов, но выше затраты на устройство внутридомовой системы отопления.

2 Техническая характеристика местных альтернативных источников отопления и горячего водоснабжения

2.1 Структурные схемы местных источников отопления и горячего водоснабжения

Основываясь на отечественном опыте и данных раздела 1, рассматриваются пять вариантов источника отопления и горячего водоснабжения, отличающиеся структурой, видом теплогенерирующего оборудования и его участием в покрытии тепловых нагрузок жилого дома.

Вариант 1 (базовое решение).

Источник отопления и горячего водоснабжения – тепловые насосы, гелиоустановка, «серые» сточные воды и тепловые сети систем централизованного теплоснабжения на основе ТЭЦ. Структурная схема теплоисточника по варианту 1 приведена на рис. 2.1.

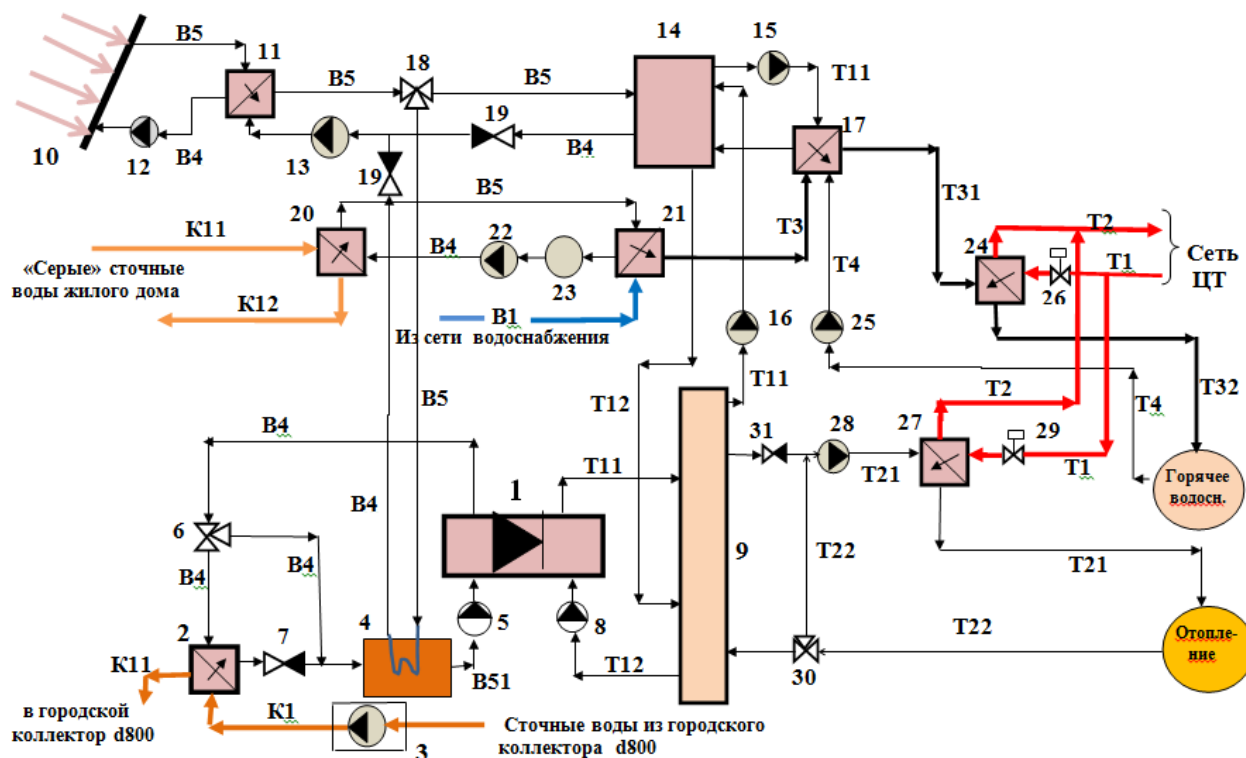


Рис.2.1. – Структурная схема источника отопления и горячего водоснабжения(вариант 1)

Тепловые насосы 1 используют теплоту городских сточных вод, отбираемую в теплообменнике 2 и теплоту солнца от гелиоколлекторов 10, переданную через трехходовой клапан 18 в бак 14 (когда теплопроизводительность гелиоколлекторов 10 больше тепловой потребности в подогреве горячей воды). Параметры тепловых насосов 1 рассчитываются из условий получения максимума энергетической эффективности. Теплопоступления от гелиоколлекторов в расчетных условиях ($t_{\text{р.}} = \text{минус } 24^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{вн}} = +18^{\circ}\text{C}$) приняты равными нулю.

В теплообменник 2 городские сточные воды подаются насосом мини-КНС 3, размещаемой в зеленой зоне улицы рядом с существующим колодцем коллектора. От мини-КНС 3 до теплообменника-рекуператора 2 через улицу (см. рис.1.1) прокладывается напорный трубопровод сточных вод. Теплообменник 2 и емкость 4, задействованные в блоке использования теплоты сточных вод, размещаются в подвале жилого дома в одном помещении с тепловыми насосами. Охлажденные в теплообменнике сточные воды отводятся в колодец дворовой канализации жилого дома. При работе гелиоколлекторов на бак 14 клапан 6 переключает поток теплоносителя контура испарителей тепловых насосов 1 в обход теплообменника 2, а мини-КНС переключается на подачу сточных вод ниже расчетных объемов.

Выработанная тепловыми насосами тепловая энергия теплоносителем контура конденсаторов передается через гидравлический разделитель 9 в системы отопления и горячего водоснабжения жилого дома.

В гелиоколлекторах 10 за счет солнечной радиации подогревается теплоноситель первичного контура гелиоустановки³ (блок оборудования 11, 12, 13, 14, 15, 17), теплота от которого передается через теплообменник 11 во вторичный контур. Насосом 13 теплоноситель вторичного контура распределяется через трехходовой клапан 18 в бак-аккумулятор 14 или в бак 4 на подогрев теплоносителя контура испарителя тепловых насосов 1.

Клапан 18 работает в направлении бака 14 при температуре теплоносителя на выходе теплообменника 11 на 3...5⁰С выше температуры подогретой воды на входе в теплообменник 17. При температуре на выходе теплообменника 11 менее 10⁰С в гелиоустановке работает только первичный контур. Возможен вариант работы гелиоустановки при интенсивной солнечной радиации в начале и окончании отопительного периода для снижения температуры теплоносителя в баке 16 только на подогрев в баке 14 теплоносителя контура конденсаторов тепловых насосов с одновременным сокращением объемов подачи сточных вод с мини-КНС 3 на теплообменник 2.

Блок утилизации теплоты «серых» сточных вод жилого дома (оборудование 20, 21, 22, 23) работает круглогодично на подогрев холодной воды, поступающей из сети водоснабжения через теплообменники 21, 17 и 24 в систему горячего водоснабжения жилого дома.

По тепловой сети теплоносителем системы централизованного теплоснабжения на основе ТЭЦ осуществляется поддержание расчетных температур в системе горячего водоснабжения регулированием при помощи клапана 26 объема подачи теплоносителя в теплообменник 24, а температур в отапливаемых помещениях – регулированием при помощи клапана 29 подачи теплоносителя в теплообменник 27.

Вариант 2.

Источник отопления и горячего водоснабжения – тепловые насосы, гелиоустановки и тепловые сети систем централизованного теплоснабжения на основе ТЭЦ. Структурная схема теплоисточника по варианту 2 приведена на рис. 2.2.

³ - разработка эксперта ПРООН/ГЭФ Покотилова В.В.[2]

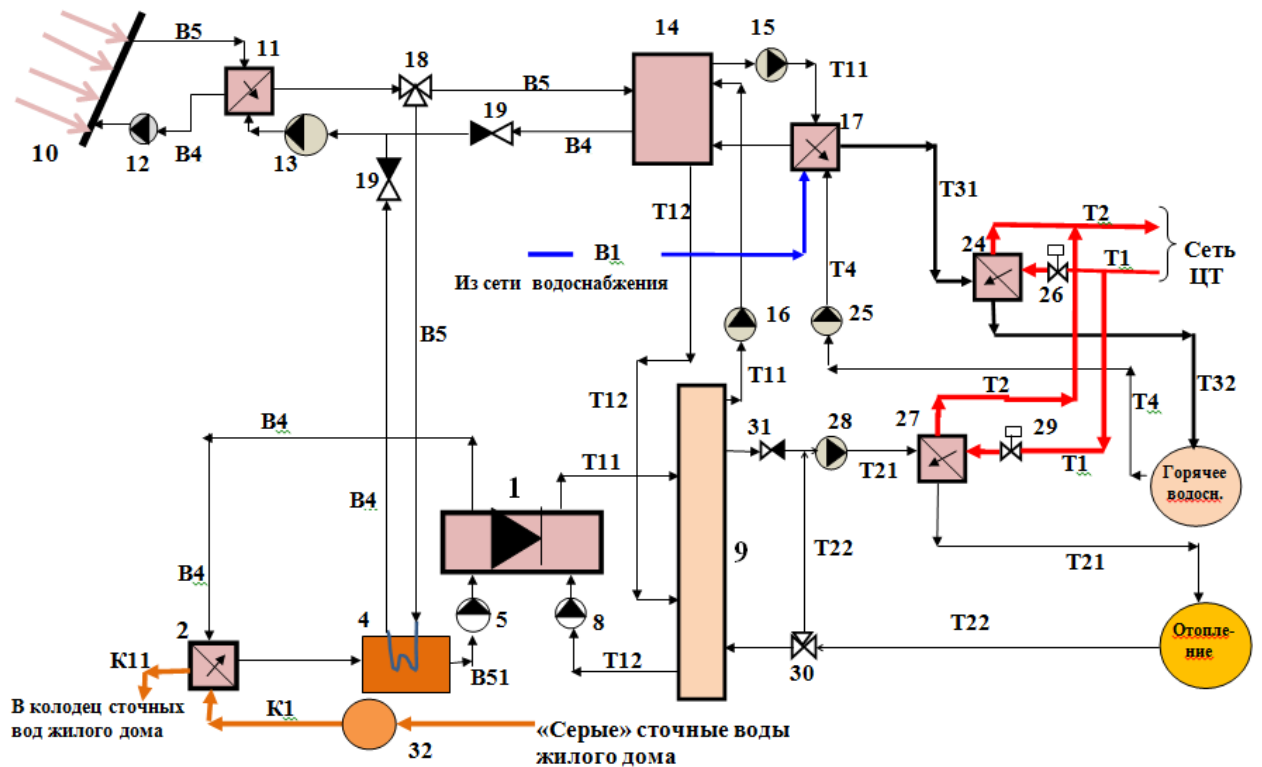


Рис.2.2. – Структурная схема источника отопления и горячего водоснабжения (вариант 2)

Принципиальное отличие варианта 2 от варианта 1 в отказе от использования теплоты городских сточных вод, в «глубоком» использовании теплового потенциала «серых» сточных вод жилого дома, в уменьшении тепловой мощности и участии тепловых насосов в покрытии тепловой нагрузки жилого дома и увеличении теплопроизводительности гелиоустановки.

Тепловые насосы 1 используют теплоту «серых» сточных вод жилого дома, отбираемую в теплообменнике 2 и теплоту солнца от гелиоколлекторов 10, переданную через трехходовой клапан 18 в бак 4. Выработанная тепловыми насосами тепловая энергия теплоносителем контура конденсаторов передается через гидравлический разделитель 17 в системы отопления и горячего водоснабжения жилого дома.

Во время отопительного периода в дневные часы провала графика горячего водоснабжения тепловые насосы 1 работают с использованием теплоты от гелиоколлекторов только на покрытие отопительной нагрузки.

Параметры тепловых насосов 1 рассчитываются по средней суточной нагрузке горячего водоснабжения в летний период года.

Вариант 3.

Источник отопления и горячего водоснабжения – тепловые насосы и тепловые сети систем централизованного теплоснабжения на основе ТЭЦ. Структурная схема теплоисточника по варианту 3 приведена на рис. 2.3.

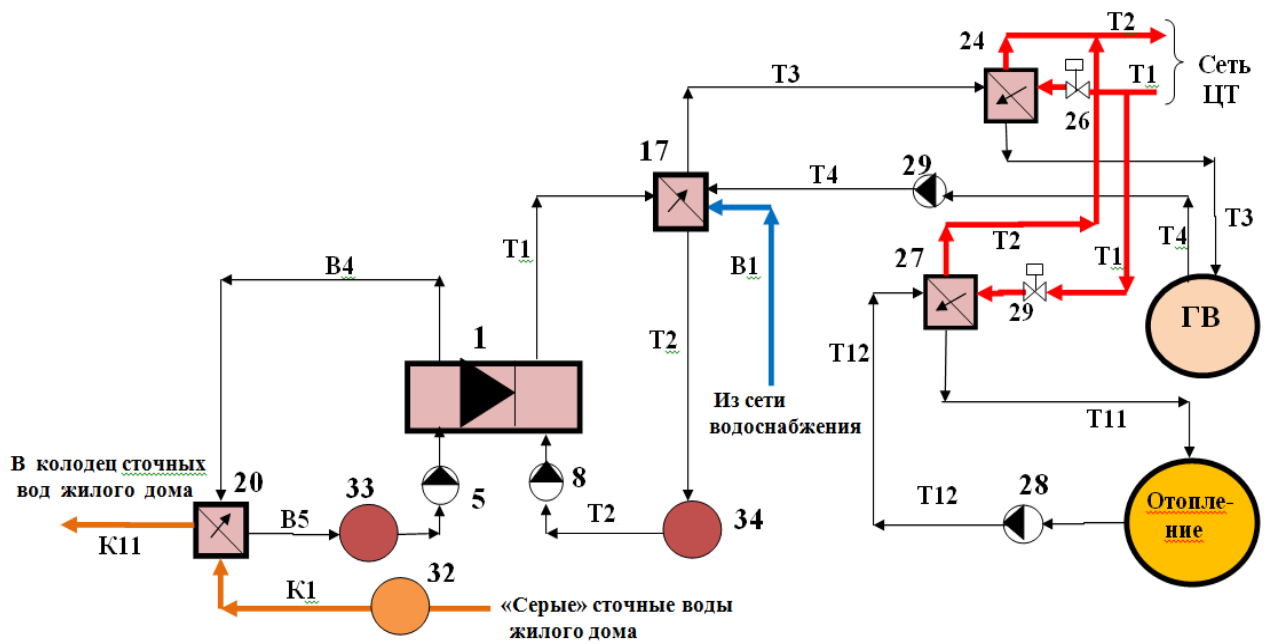


Рис.2.3. – Структурная схема источника отопления и горячего водоснабжения (вариант 3)

Принципиальное отличие варианта 3 от варианта 2 в отказе от устройства гелиоустановки и использовании теплового потенциала «серых» сточных вод жилого дома тепловыми насосами, параметры которых рассчитываются на покрытие средней суточной нагрузки горячего водоснабжения.

Вариант 4.

Источник отопления и горячего водоснабжения – гелиоустановки, «серые» сточных вод пилотного жилого дома и тепловые сети систем централизованного теплоснабжения на основе ТЭЦ. Структурная схема теплоисточника по варианту 4 приведена на рис. 2.4.

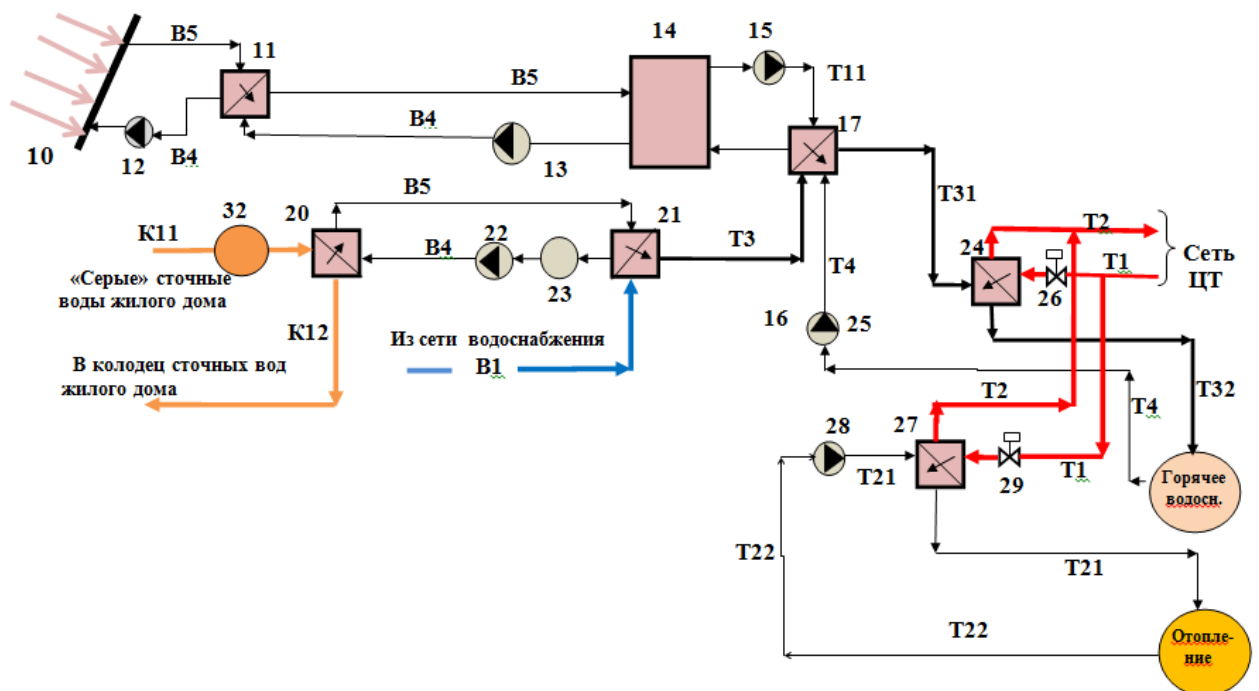


Рис.2.4 – Структурная схема источника отопления и горячего водоснабжения (вариант 4)

В варианте 4 реализуется возможность сокращения потребления тепловой энергии от внешних источников за счет использования только теплоты «серых» сточных вод и солнечной радиации при минимальной нагрузке на сеть электроснабжения жилого дома.

Главным недостатком варианта является зависимость их эффективности от природных условий и непредсказуемости объемов и режимов водопотребления жителями дома.

Вариант 5.

Источник отопления и горячего водоснабжения – тепловые насосы, «серые» сточные воды и тепловые сети систем централизованного теплоснабжения на основе ТЭЦ. Структурная схема теплоисточника по варианту 5 приведена на рис. 2.5.

Принципиальное отличие источника отопления и горячего водоснабжения от базового технического решения (вариант 1) в отказе от применения гелиоустановки и работе тепловых насосов в межотопительный период на 100% покрытия нагрузки горячего водоснабжения.

Как и в варианте 1 теплопроизводительность тепловых насосов рассчитывается на покрытие в отопительный период только части нагрузки отопления и горячего водоснабжения.

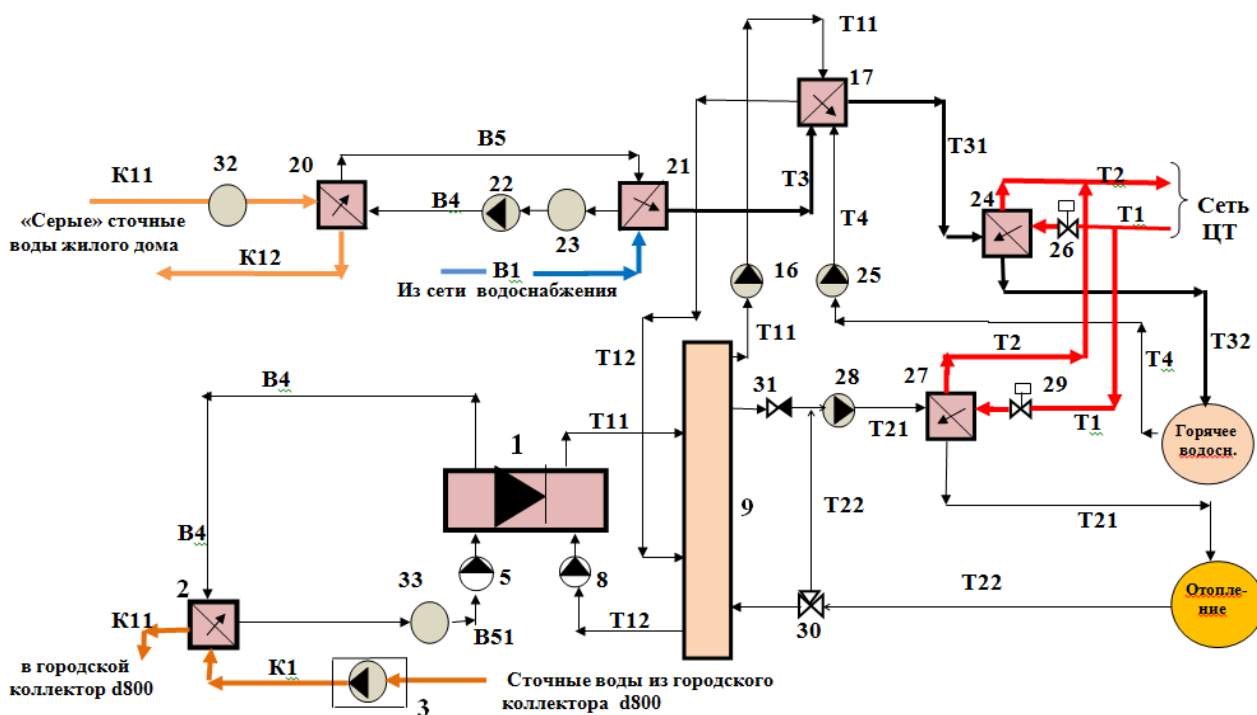


Рис.2.5. – Структурная схема источника отопления и горячего водоснабжения (вариант 5)

2.2 Расчет энергетических потоков в местных источниках отопления и горячего водоснабжения

Во всех альтернативных источниках отопления и горячего водоснабжения жилого дома, согласно разделу 2.1, предлагается использовать теплоту «серых» сточных вод жилого дома. Утилизация теплоты городских сточных вод с применением тепловых насосов предусматривается в вариантах 1 и 5. В вариантах 2, 3 и 4 в расчетных условиях ($t_{нар.} = \text{минус } 24^{\circ}\text{C}$) основным источником покрытия нагрузки отопления и горячего водоснабжения (более 75%) является ТЭЦ. Участие гелиоустановки в вариантах 1, 2 и 4 при $t_{нар.} = \text{минус } 24^{\circ}\text{C}$ не планируется.

По данным разделов 1.2 и 2.1 рассчитано участие теплогенерирующего оборудования альтернативных источников в покрытии тепловых нагрузок жилого дома. Результаты сведены в таблицу 2. 1.

Таблица 2.1. – Расчетные тепловые нагрузки на систему отопления (ОС) и горячего водоснабжения (ГВС) жилого дома и структура источников их покрытия

Варианты	Расчетная тепловая нагрузка, кВт			Источники покрытия тепловой нагрузки, кВт						
	ОС	ГВС	итого	Тепловые насосы ($Q_{ТН}^{расч.}$)		Гелио-установка	Блок «серых» сточных вод	Тепловая сеть от ТЭЦ		
				итого	в том числе			ГВС	ГВС	ОС
						ОС	ГВС			
Вариант 1	155,0	81,4	236,4	135,9	103,3	32,6	0	24,4	51,7	24,4
Вариант 2	-“-	-“-	-“-	57,0	0	57,0	0	-	155,0	24,4
Вариант 3	-“-	-“-	-“-	57,0	-	57,0	-	-	155,0	24,4
Вариант 4	-“-	-“-	-“-	-	-	-	0	24,4	155,0	57,0
Вариант 5	-“-	-“-	-“-	135,9	103,3	32,6	-	24,4	51,7	24,4

Как следует из табл. 2.1, в поливалентном источнике отопления и горячего водоснабжения, реализуемом в вариантах 1 и 5, тепловыми насосами покрывается 66,6% расчетной отопительной нагрузки и 40,0% - горячего водоснабжения. За счет рекуперации теплоты сточных вод покрывается около 30% расчетной нагрузки горячего водоснабжения. По тепловой сети от ТЭЦ планируется догрев теплоносителей до температур, обеспечивающей поддержание нормируемых температур в отапливаемых помещениях и в сети горячего водоснабжения.

Теплопоступления от гелиоколлекторов в расчетных условиях отопления и горячего водоснабжения ($t_{р.} = \text{минус } 24^{\circ}\text{C}$, $t_{вн} = +18^{\circ}\text{C}$) приняты равными нулю. В расчетах величины тепловых потоков от источников низкопотенциальной теплоты для тепловых насосов ($Q_{НПТ}^{расч.}$) и потребляемой мощности компрессоров тепловых насосов ($P_{компрес.ТН}$) использованы значения $Q_{ТН}^{расч.}$, приведенные в табл. 2.2, и следующие значения коэффициента трансформации низкопотенциальной теплоты ($\epsilon_{ТН}$):

- при использовании теплоты городских сточных вод по варианту 1 – 4,2 (зима)⁴ и 4,6 (лето)⁵;
- при использовании теплоты городских сточных вод по варианту 5 – 4,2 (зима)⁴ и 4,1 (лето)⁶;
- при использовании теплоты «серых» сточных вод (варианты 2 и 3) – 4,5 (зима и лето)⁷.

Расчетное количество теплоты, отбираемой от источников низкопотенциальной теплоты, определяется из соотношения $Q_{\text{НПИТ}}^{\text{расч.}} = Q_{\text{ТН}}^{\text{расч.}} \cdot (\epsilon_{\text{ТН}} - 1) / \epsilon_{\text{ТН}}$.

Потребляемая мощность компрессоров тепловых насосов и циркуляционных насосов теплоносителей контуров тепловых насосов определяется из соотношений:

- для компрессоров тепловых насосов – $P_{\text{компрес.ТН}} = Q_{\text{ТН}}^{\text{расч.}} / \epsilon_{\text{ТН}}$;
- для циркуляционных насосов контуров ($P_{\text{цирк.нас. ТН}}$) в варианте 1 – 0,15 $P_{\text{компрес.ТН}}$, вариантах 2 и 3 – 0,2 $P_{\text{компрес.ТН}}$.

Результаты расчетов потоков низкопотенциальной теплоты и мощности электропотребляющего оборудования в расчетных условиях отопления ($t_{\text{нар.}} = \text{минус } 24^{\circ}\text{C}$) приведены в таблице 2.2. Мощность циркуляционных насосов контуров теплопотребления учитываются в составе традиционного теплового пункта жилого дома.

Таблица 2.3. – Значения расчетных потоков низкопотенциальной теплоты и мощности электропотребляющего оборудования ($t_{\text{нар.}} = \text{минус } 24^{\circ}\text{C}$)

Варианты	Потоки низкопотенциальной теплоты, кВт			Мощности электропотребляющего оборудования, кВт			
	Тепловые насосы	Гелио-установки	Блок «серых» вод	Компрессоры тепловых насосов	Циркуляционные насосы контуров	Неучтенные расходы (5%)	Итого
Вариант 1	104,2	-	24,4	32,4	4,9	1,9	39,2
Вариант 2	44,3	-	-	12,7	2,5	0,8	16,0
Вариант 3	44,3	-	-	12,7	2,5	0,8	16,0
Вариант 4	-	-	24,4	-	2,2	0,1	2,3
Вариант 5	104,2	-	24,4	32,4	4,9	1,9	39,2

В основу расчета годового теплопотребления положены данные о тепловых нагрузках (см. табл. 2.1), параметрах наружного воздуха ($t_{\text{н.ср.от.}} = \text{минус } 1,5^{\circ}\text{C}$) и продолжительности отопительного периода (204 сутки). Годовой объем выработки теплоты источниками отопления и горячего водоснабжения принят равным теплопотреблению потребителями жилого дома.

Результаты расчетов годового теплопотребления и выработки теплоты

⁴ - при температуре теплоносителя на входе в испаритель 7°C , выходе из конденсатора 45°C

⁵ - при температуре теплоносителя на входе в испаритель 12°C , выходе из конденсатора 45°C

⁶ - при температуре теплоносителя на входе в испаритель 12°C , на выходе конденсатора 55°C

⁷ - при температуре теплоносителя на входе в испаритель 10°C , выходе из конденсатора 45°C

альтернативными источниками сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3. – Годовое теплотребление и источники покрытия по рассматриваемым вариантам структуры источников системы отопления (ОС) и горячего водоснабжения (ГВС)

Варианты	Годовое теплотребление, Гкал			Источники покрытия, Гкал								
	ОС	ГВС	итого	Тепловые насосы (Q _{ТН} ^{расч.})			Гелио-установки	Блок «серых» вод	Тепловая сеть от ТЭЦ			
				итого	в том числе				ГВС	ГВС	ОС	ГВС
					ОС	ГВС						
Вариант 1	303,0	586,3	889,3	407,2	280,0	127,2	211,9	146,6	23,0	100,6		
зима	303,0	342,7	645,7	382,8	280,0	102,8	61,7	85,7	23,0	92,5		
лето	-	243,6	243,6	24,4	-	24,4	150,2	60,9	-	8,1		
Вариант 2	-“-	-“-	-“-	217,2	35,5	181,7	211,9	-	267,5	192,7		
зима	-“-	-“-	-“-	131,9	35,5	96,4	61,7	-	267,5	184,6		
лето	-“-	-“-	-“-	85,3	-	85,3	150,2	-	-	8,1		
Вариант 3	-“-	-“-	-“-	358,4	90,0	268,4	-	-	213,0	317,9		
зима	-“-	-“-	-“-	240,0	90,0	150,0	-	-	213,0	192,7		
лето	-“-	-“-	-“-	118,4	-	118,4	-	-	-	125,2		
Вариант 4	-“-	-“-	-“-	-	-	-	211,9	156,9	303,0	217,5		
зима	-“-	-“-	-“-	-	-	-	61,7	102,8	303,0	178,2		
лето	-“-	-“-	-“-	-	-	-	150,2	54,1	-	39,3		
Вариант 5	-“-	-“-	-“-	565,5	280,0	285,5	-	146,6	23,0	154,2		
зима	-“-	-“-	-“-	382,8	280,0	102,8	-	85,7	23,0	154,2		
лето	-“-	-“-	-“-	182,7	-	182,7	-	60,9	-	-		

Годовой расход электрической энергии на выработку теплоты электропотребляющим оборудованием определен как сумма расходов электрической энергии на выработку теплоты компрессорами тепловых насосов и циркуляционными насосами.

Годовой расход электрической энергии на выработку теплоты тепловым насосом определяется по формуле:

$$W_{\text{ТН}}^{\text{год}} = Q_{\text{ТН}} / 0,86 \times \varepsilon_{\text{ТН.ср.}}^{\text{зим}} + Q_{\text{ТН}}^{\text{лет}} / 0,86 \times \varepsilon_{\text{ТН.ср.}}^{\text{лет}},$$

где Q_{ТН}^{год} – годовая выработка теплоты тепловыми насосами, Гкал; ε_{ТН.ср.} – средний за рассматриваемые периоды года коэффициент трансформации низкопотенциальной теплоты для выработки теплоты. В расчетах принимаются значения ε_{ТН.ср.} равными:

- для варианта 1: зима – 4,9; лето - 4,6;

- для вариантов 2 и 3: зима – 5,2; лето – 4,54;
- для варианта 5: зима -5,2; лето – 4,1.

При определении $\varepsilon_{\text{тн.ср.}}$ учитывалось, что выработка теплоты тепловым насосом в отопительный период осуществляется по графику качественного регулирования, т.е. со снижением температуры теплоносителя при снижении тепловой нагрузки.

Годовой расход электрической энергии на подачу низкопотенциальной теплоты и работу циркуляционных насосов контуров испарителей и конденсаторов тепловых насосов определяется как процент от расхода электрической энергии на привод тепловых насосов и: для вариантов 1 и 5 – 8%, вариантов 2 и 3 – 4%. Годовой расход электрической энергии на работу гелиоустановки (варианты 1, 2 и 3) принят⁸ равным 7 МВтч, а на привод циркуляционных насосов блока утилизации «серых» сточных вод (варианты 1 и 4) – около 2,5 МВтч. Годовой расход электрической энергии циркуляционными насосами контуров теплопотребления одинаковы для всех вариантов и в расчетах не учитываются.

Результаты расчетов годового расхода электрической энергии на выработку тепловой энергии собственным теплогенерирующим оборудованием источника отопления и горячего водоснабжения жилого дома и расхода теплоты от ТЭЦ для догрева теплоносителя системы отопления и горячей воды в системе горячего водоснабжения (см. табл.2.3) сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4. – Годовые расходы электрической энергии на выработку тепловой энергии местным оборудованием и объемы годового поступления тепловой энергии от ТЭЦ

Варианты	Всего, МВт-ч	В том числе					Годовое поступление теплоты от ТЭЦ ($Q_{\text{ТЭЦ}}^{\text{год}}$)	
		тепловые насосы	циркуляционные насосы, итого	в том числе			Гкал	% от общего теплопотребления
				тепловые насосы	гелиоустановки	блок «серых» вод		
Вариант 1	114,3	97,0	17,3	7,8	7,0	2,5	123,6	13,9
Вариант 2	60,6	51,5	9,1	2,1	7,0	-	460,2	51,8
Вариант 3	87,6	84,3	3,3	3,3	-	-	530,9	59,7
Вариант 4	9,5	-	9,5	-	7,0	2,5	520,5	58,5
Вариант 5	150,9	137,4	13,5	11,0	-	2,5	177,2	19,9

Из анализа данных табл. 2.1-2.4 следует, что источник отопления и горячего водоснабжения, формируемый по варианту 1 в сравнении с альтернативными вариантами 2, 3 и 4, характеризуется меньшим участием ТЭЦ в покрытии тепловых потребностей жилого дома, большей мощностью и объемами электропотребления. Собственным теплогенерирующим оборудованием покрывается 86,1% суммарного годового теплопотребления жилого дома, в том числе тепловыми насосами – 45,8%,

⁸ По данным эксперта ПРООН/ГЭФ Покотилова В.В.[2]

гелиоустановками – 23,8%, блоком утилизации «серых» сточных вод жилого дома – 16,5%. На долю внешнего теплоисточника (ТЭЦ) приходится только 13,9%.

В сравнении с вариантом 5 при равной потребляемой мощности в расчетных условиях ($t_{нар.} = \text{минус } 24^{\circ}\text{C}$) источник по варианту 1 меньше потребляет электрической энергии на выработку теплоты (на 24,3%) при большем участии в покрытии годового теплотребления жилым домом (на 7,0%) и имеет лучшие показатели из-за применения в его структуре гелиоустановки.

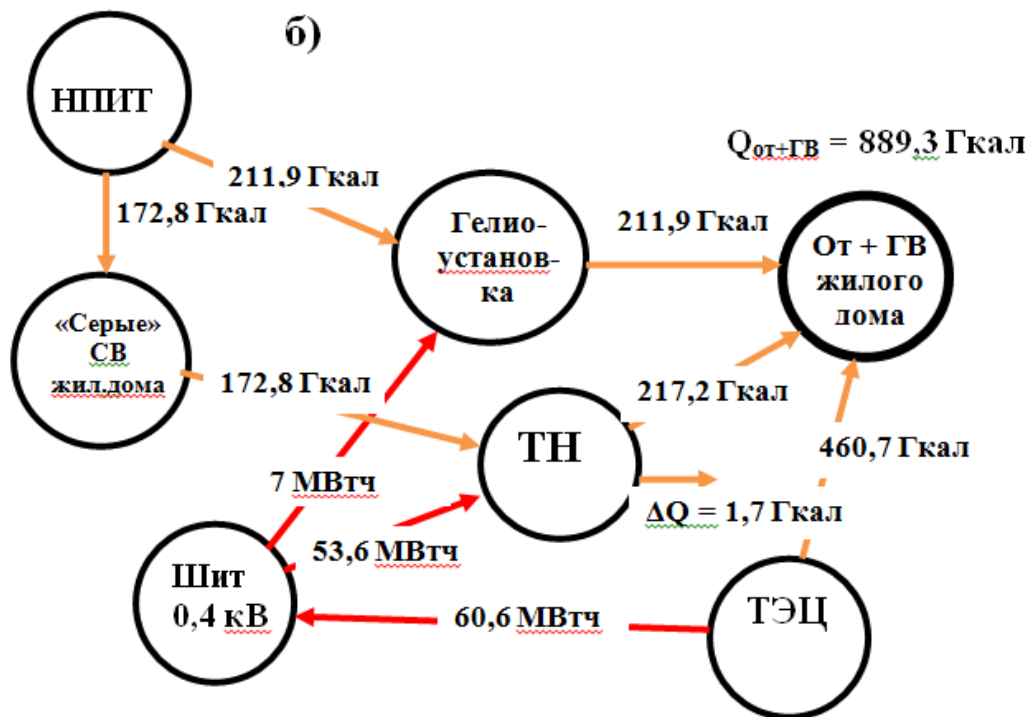
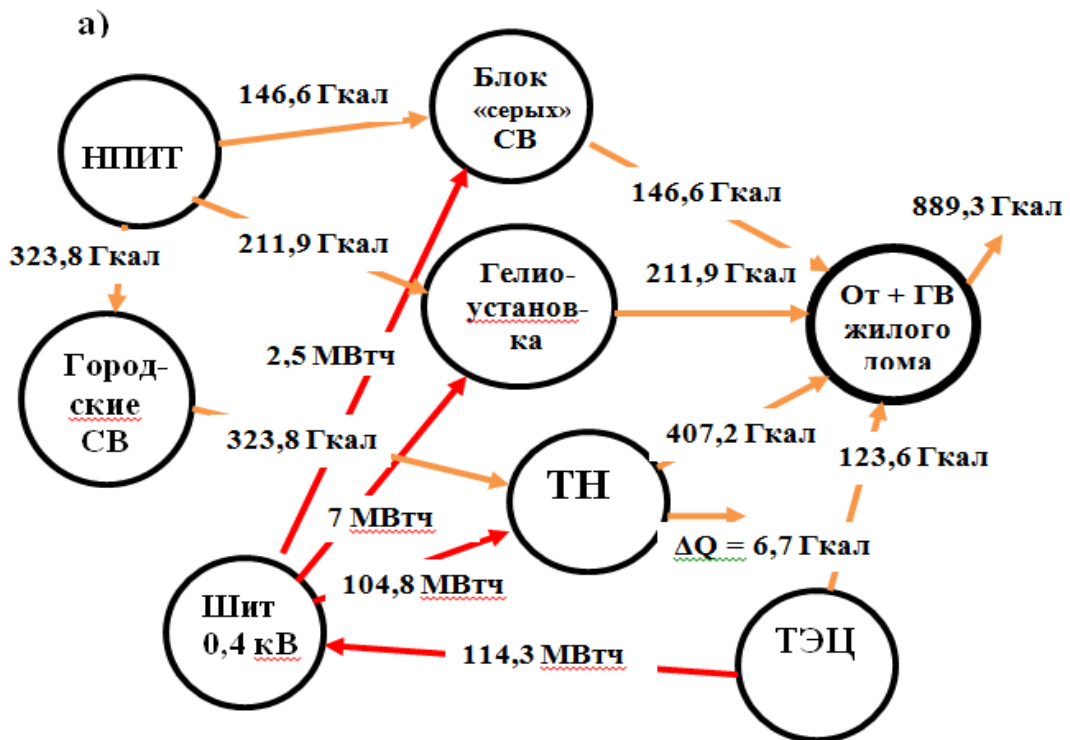
Противоположные варианту 1 показатели достигаются при реализации источника отопления и горячего водоснабжения по варианту 4. Это значительно меньшая электрическая нагрузка (в 17 раз) и объемы годового электропотребления (в 12 раз). От собственного теплогенерирующего оборудования (гелиоустановка и блок утилизации «серых» сточных вод жилого дома) покрывается около 41,5 % теплотребления жилого дома.

Кроме приведенного, практическое значение имеет сравнение альтернативных вариантов по объемам использования местных источников низкопотенциальной теплоты (см. разделы 1.2 и 2.1), величины которых приведены в таблице 2.5.

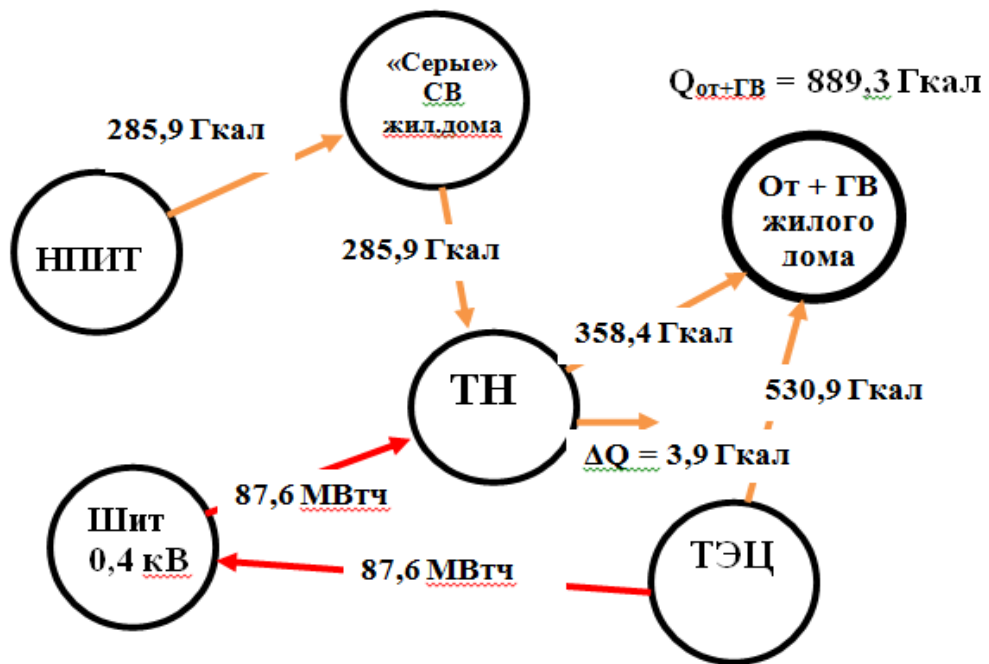
Таблица 2.5. – Годовые объемы использования местных источников низкопотенциальной теплоты (НПИТ)

Варианты	Всего, Гкал	в том числе		
		городских сточных вод	солнечной энергии	«серых» вод
Вариант 1	636,9	323,8	211,9	146,6
зима	409,4	304,7	61,7	85,7
лето	227,5	19,1	150,2	60,9
Вариант 2	384,7	-	211,9	172,8
зима	169,0	-	61,7	106,5
лето	216,5	-	150,2	66,3
Вариант 3	285,9	-	-	285,9
зима	193,8	-	-	193,8
лето	92,1	-	-	92,1
Вариант 4	368,8	-	211,9	156,9
зима	164,5	-	61,7	102,8
лето	204,3	-	150,2	54,1
Вариант 5	589,4	442,8		146,6
зима	390,4	304,7	-	85,7
лето	199,0	138,1	-	60,9

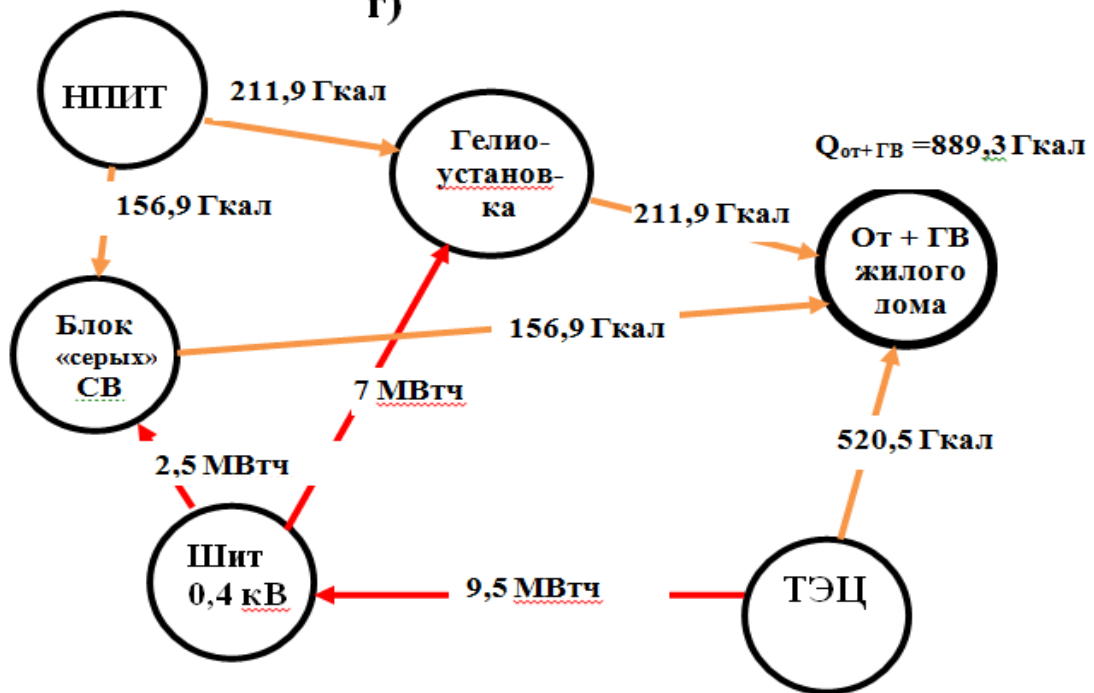
Для наглядности на основании данных табл. 2.3, 2.4 и 2.5 построены блок-схемы альтернативных источников отопления и горячего водоснабжения пилотного жилого дома с указанием величин годовых энергетических потоков (рис.2. 6).



В)



Г)



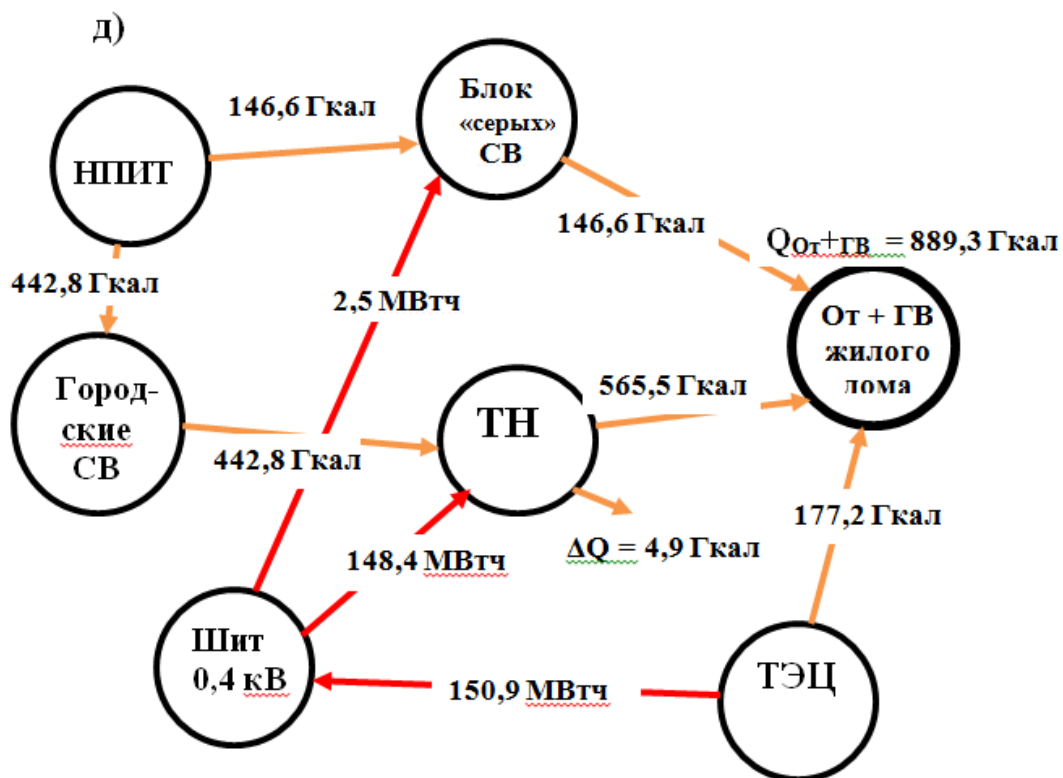


Рис.2.6: Блок-схемы источников отопления и горячего водоснабжения (а – вариант 1, б – вариант 2, в – вариант 3, г – вариант 4, д – вариант 5)

2.3 Выбор тепловых насосов, возможных для применения в структуре местного источника горячего водоснабжения

Основными техническими требованиями к тепловым насосам, возможным для применения в структуре источника теплоснабжения жилого дома являются: класс энергетической эффективности A++, применение озонобезопасных рабочих агентов, диапазон рабочих температур, управляемость, шумовые характеристики, компактность. Указанным параметрам отвечают тепловые насосы многих фирм, имеющих в республике своих представителей или дилеров, обеспечивающих сервисное обслуживание тепловых насосов.

На предпроектной стадии обоснования источника отопления и горячего водоснабжения энергоэффективного жилого дома для расчетов принимаем тепловые насосы, технические характеристики которых приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6. – Технические характеристики тепловых насосов и «вода-вода» [4]

Показатели	Температура теплоносителей на выходе конденсаторов, °С	Тип 1		Тип 2	
		Температура теплоносителей на входе в испарители, °С			
		10	15	5	10
Тепловая мощность, кВт	35	31,89	36,84	65,53	74,16
	45	29,97	34,0	63,6	71,84
	55	28,37	31,94	61,29	69,01
Количество теплоты источника, кВт	35	26,78	31,55	52,66	61,12
	45	23,84	27,75	48,02	55,99
	55	21,03	24,47	42,85	50,12
Мощность спиральных компрессоров, кВт	35	5,12	5,29	12,88	13,04
	45	6,13	6,25	15,57	15,86
	55	7,34	7,47	18,44	18,89
Коэффициент трансформации теплоты, кВт	35	6,23	6,96	5,09	5,69
	45	4,89	5,44	4,08	4,53
	55	3,87	4,28	3,32	3,65
Вид рабочего агента (количество, кг)		R407C (2,2)		R410A (4,8)	
Номинальный поток теплоносителя в испарителе, м ³ /час		4,25		10,44	
Максимально допустимое внешнее давление в испарителе, кПа		92		72	
Номинальный поток теплоносителя в конденсаторе, м ³ /час		1,94		4,82	
Максимально допустимое внешнее давление в конденсаторе, кПа		78		50	
Выходная мощность шумов (LWA), dB(A)		49		51	
Габариты (ширина x глубина x высота), м		0,6 x 0,62 x 1,8		0,6 x 0,62 x 1,8	
Вес, кг		325		353	

В рассматриваемых вариантах 1, 2 и 3 в составе источников отопления и горячего водоснабжения пилотного жилого дома планируется установить парокомпрессионные тепловые насосы типа «вода-вода» (см. табл. 2.6). Их теплопроизводительность определяется по величине присоединенной тепловой нагрузки (см. раздел 2.3).

Результаты выбора количества и тепловой мощности тепловых насосов в расчетных условиях работы местных теплоисточников приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7. – Выбор количества и тепловой мощности тепловых насосов

Варианты	Расчетная тепловая нагрузка жилого дома, кВт			Тепловая нагрузка, покрываемая тепловыми насосами ($Q_{ТН}^{расч.}$), кВт			Вид используемых НПИТ	Количество и мощность тепловых насосов, шт. x кВт
	ОС	ГВС	итого	итого	в том числе			
					ОС	ГВС		
Варианты 1 и 5	155,0	81,4	236,4	135,9	103,3	32,6	Городские сточные воды	2 x 67,0 ^{а)}
Вариант 2	-“-	-“-	-“-	57,0	0	57,0	«Серые» воды дома	2 x 30 ^{б)}
Вариант 3	-“-	-“-	-“-	57,0	-	57,0		

а) - при температуре теплоносителя на входе в испаритель 7⁰С, выходе из конденсатора 45⁰С;

б) - при температуре теплоносителя на входе в испаритель 10⁰С, выходе из конденсатора 45⁰С

Для всех рассмотренных вариантов тепловые насосы покрывают часть тепловых нагрузок жилого дома. Минимальные температуры теплоносителя на входе в испарители 5⁰С. Температура теплоносителя на выходе конденсаторов изменяется по графику качественного регулирования системы отопления: от 30⁰С до 47⁰С. В межотопительный период вместе с блоком «серых» сточных вод жилого дома тепловые насосы работают на покрытие 100% нагрузки горячего водоснабжения с температурой теплоносителя на выходе конденсаторов 55⁰С. Расчетная разность температур теплоносителей в испарителях и конденсаторах принимается по паспортным данным тепловых насосов (от 3⁰С до 10⁰С). Все устанавливаемые тепловые насосы технологически стыкуются для работы в технологическом каскаде.

Планируется, что тепловые насосы и все оборудование контуров испарителей и конденсаторов будут располагаться в одном помещении или рядом с тепловым пунктом жилого дома.

3 Технико-экономическое сравнение местных альтернативных источников отопления и горячего водоснабжения

3.1 Энергетическое сравнение

Энергетическое сравнение рассматриваемых источников отопления и горячего водоснабжения пилотного жилого дома выполняется по величине годового расхода первичного топлива ($\mathbf{B}^{\text{год}}$), расходуемого на источниках выработки электрической и тепловой энергии, которые потребляются альтернативными источниками за год:

$$\mathbf{B}^{\text{год}} = \mathbf{Q}^{\text{год}} \mathbf{b}_{\text{т3}} + \mathbf{W}^{\text{год}} \mathbf{b}_{\text{э3}}, \text{ кг у.т.}$$

где $\mathbf{Q}^{\text{год}}$ – объемы годовой выработки тепловой энергии, Гкал; $\mathbf{W}^{\text{год}}$ – объемы годового потребления электрической энергии местным (собственным) источником отопления и горячего водоснабжения жилого дома, МВтч; $\mathbf{b}_{\text{т3}}$ – удельный расход топлива на выработку тепловой энергии, кг у.т./Гкал; $\mathbf{b}_{\text{э3}}$ – удельный расход топлива на выработку электрической энергии, кг у.т./МВтч.

За основу расчета годового расхода топлива приняты следующие данные:

- объемы годового потребления тепловой энергии жилым домом от различных теплоисточников (см. табл. 2.4);
- объемы годового электропотребления оборудованием местного (собственного) источника отопления и горячего водоснабжения (см. табл.2.5);
- данные о значениях удельных расходов топлива на выработку электрической и тепловой энергии на энергоисточниках Белорусской энергосистемы ($\mathbf{b}_{\text{э3}} = 254,9$ кг у.т./МВтч и $\mathbf{b}_{\text{т3}} = 168,4$ кг у.т./Гкал);
- данные об удельных расходах условного топлива на выработку электрической и тепловой энергии на ближайшем теплоисточнике – Могилевской ТЭЦ-1 (в табл. 1.1 – $\mathbf{b}_{\text{э3}} = 162,8$ кг у.т./МВтч и $\mathbf{b}_{\text{т3}} = 174,8$ кг у.т./Гкал).

Результаты расчетов приведены в таблице 3.1. На основании данных табл.3.1 сравниваемые по энергетической эффективности альтернативные источники отопления и горячего водоснабжения можно ранжировать в следующей последовательности: **вариант 1** → **вариант 5** → **вариант 2** → **вариант 4** → **вариант 3**. Энергетические преимущества первых вариантов (варианты 1 и 5) – в применении тепловых насосов, использующих условно «неограниченный» тепловой потенциал городских сточных вод.

Таблица 3.1. – Расходы первичного топлива для выработки тепловой энергии альтернативными источниками отопления и горячего водоснабжения (в числителе – энергосистема, в знаменателе – Могилевская ТЭЦ-1)

Варианты	Годовое потребление тепловой энергии жилым домом, Гкал	Годовой расход энергоресурсов, потребляемые альтернативными источниками отопления и ГВС		Годовой расход первичного топлива, т у.т.				
		электрической энергии, МВт·ч	тепловой энергии от ТЭЦ, Гкал	Тепловые насосы	Гелио-установки	Блок «серых» вод	ТЭЦ	Итого
Вариант 1	889,3	114,3	123,6	26,7/17,1	1,8/1,1	0,6/0,4	20,8/21,6	49,9/40,2
Вариант 2	“-	60,6	460,2	13,7/8,7	1,8/1,1	-	77,5/80,4	93,0/90,2
Вариант 3	“-	87,6	530,9	22,3/14,3	-	-	89,4/92,8	111,7/107,1
Вариант 4	“-	9,5	520,9	-	1,8/1,1	0,6/0,4	87,7/91,0	90,1/92,5
Вариант 5	“-	150,9	177,2	37,8/24,2	-	0,6/0,4	29,8/31,0	68,2/55,6

3.2 Экологическое сравнение

Критерием экологической эффективности принят объем выбросов CO₂, т.к. все применяемые тепловые насосы заправлены экологически чистыми рабочими агентами (фреоны R 407C и R410A).

Принимаем, что для производства тепловой и электрической энергии на энергоисточниках Белорусской энергосистемы и Могилевской ТЭЦ-1 используется только один вид топлива (природный газ) с выбросами равными 1,7 тонны CO₂ при сжигании 1 т у.т. В таблице 3.2. приведены значения объемов выбросов CO₂, которые характеризуют экологическую эффективность альтернативных источников отопления и горячего водоснабжения пилотного жилого дома.

Таблица 3.2. – Объемы выбросов CO₂ на энергоисточниках при сжигании топлива для выработки тепловой и электрической энергии для отопления и горячего водоснабжения пилотного дома

Варианты	Годовой расход первичного топлива, т у.т.		Объемы выбросов CO ₂ , тонн	
	На источниках энергосистемы	На Могилевской ТЭЦ-2	На источниках энергосистемы	На Могилевской ТЭЦ-2
Вариант 1	49,9	40,2	84,8	68,3
Вариант 2	93,0	90,2	158,1	153,3
Вариант 3	111,7	107,1	189,9	182,1
Вариант 4	90,1	92,5	153,2	157,3
Вариант 5	68,2	55,6	115,9	94,5

Как видно, выводы экологического сравнения и энергетического одинаковы. Кроме того, очевидны экологические преимущества источников отопления и горячего водоснабжения по вариантам 1 и 5 в значительном сокращении объемов выбросов CO₂ в окружающую среду г. Могилева.

3.3 Экономическое сравнение

Основными экономическими показателями для сравнения рассматриваемых альтернативных источников отопления и горячего водоснабжения, как объектов нового строительства, являются величины необходимых капитальных вложений на их сооружение и ежегодных эксплуатационных затрат на функционирование.

Капитальные вложения на сооружение определены по результатам анализа данных, полученным от организаций, представляющих интересы фирм-изготовителей в Республике Беларусь (без уплаты таможенной пошлины и НДС) и на основании опыта монтажа и наладки тепловых насосов и периферийного оборудования. В расчетах использованы приведенные ниже данные:

- приобретение и обвязка тепловых насосов: варианты 1 и 5 (2x67 кВт) – 41,5 тыс. долл.; варианты 2 и 3 (2x30 кВт) – 30,8 тыс. долл.
- приобретение, монтаж и наладка гелиоустановки⁹: варианты 1, 2 и 4 – 18,2 тыс. долл.;
- приобретение строительных материалов и работы: варианты 1, 2 и 3 – 7,5 тыс. долл.
- приобретение оборудования и обвязка блока утилизации теплоты «серых» сточных вод: варианты 1, 4 и 5 – 14,8 тыс. долл.;
- строительство мини-КНС и напорной канализационной сети да жилого дома: варианты 1 и 5 – 20 тыс. долл.;
- приобретение оборудования и обвязка контура испарителей тепловых насосов:
- варианты 1, 2, 3 и 5 – 17,0 тыс. долл.;
- приобретение оборудования и обвязка контура конденсаторов тепловых насосов:
- варианты 1, 2, 3 и 5 – 3,8 тыс. долл.;
- прочие расходы: варианты 1 и 5 – 15,0 тыс. долл.; варианты 2 и 4 – 8,0 тыс. долл.; вариант 3 – 9 тыс. долл.;

Результаты расчета капитальных вложений, необходимых для сооружения источника теплоснабжения жилого дома, сведены в таблицу 3.3.

⁹ - По данным эксперта ПРООН/ГЭФ Покотилова В.В.[2]

Таблица 3.3. – Капитальные вложения на сооружение источника теплоснабжения*(тыс. долл. США)

Варианты	Всего	в т. ч. приобретение и обвязка				
		тепловых насосов и контуров испарителей и конденсаторов	мини-КНС и напорной канал сети	гелио-установки	блока «серых» вод	прочие расходы
Вариант 1	137,8	62,3	20,0	25,7	14,8	15,0
Вариант 2	85,3	51,6	-	25,7	-	8,0
Вариант 3	60,6	51,6	-	-	-	9,0
Вариант 4	48,5	-	-	25,7	14,8	8,0
Вариант 5	112,1	62,3	20,0	-	14,8	15,0

*- приведенные значения, включая стоимость оборудования, монтажные и наладочные работы, будут уточнены на стадии разработки проектной документации и по результатам тендерных торгов

Ежегодные эксплуатационные расходы определяются по уравнению

$$I_{\Sigma} = I_{\text{энерг.}} + I_a + I_{\text{тек.рем.}} + I_{\text{экол.}} + I_{\text{обслуж.}}$$

где $I_{\text{энерг}}$ - затраты на оплату за электрическую и тепловую энергию; I_a - амортизационные отчисления, равные сумме отчислений на реновацию (полное восстановление основных фондов) и капитальный ремонт; $I_{\text{тек.рем.}}$ - затраты на текущий ремонт; $I_{\text{экол.}}$ - плата за выбросы парниковых газов (CO_2); $I_{\text{обслуж.}}$ - расходы на обслуживание.

В расчетах $I_{\text{энерг}}$ использованы расчетные данные о годовых расходах электрической и тепловой энергии (см. табл. 2.3 и 2.4) и значения стоимости энергоресурсов, отпускаемых с Могилевской ТЭЦ-2 (см. табл. 1.1):

- на электроэнергию – 65,7 долл. США;
- на тепловую энергию – 38,6 долл. США .

Этим принимается, что население оплачивает электрическую и тепловую энергию без льготирования государством.

Для определения значений I_a приняты следующие средневзвешенные значения отчислений от капитальных вложений на реновацию (полное восстановление основных фондов) и капитальный ремонт оборудования, учитывающие срок службы – $p_{\text{рен.}}=5\%$; $p_{\text{кап. ремонт}}=5\%$.

Расчет значений I_a для различных вариантов выполним из соотношения

$$I_a = (p_{\text{рен.}} + p_{\text{кап. ремонт}}) K$$

Значения $I_{\text{тек. ремонт}}$ определяются в % от амортизационных отчислений, которые учитывают нормативные технические требования и местные особенности эксплуатации теплоисточников – $p_{\text{тек. ремонт}} = 10\%$.

Величина $I_{\text{тек. ремонт}}$ определяется из соотношения

$$I_{\text{тек. ремонт}} = p_{\text{тек. ремонт}} I_a .$$

Плата за выбросы парниковых газов рассчитывается по стоимости эмиссии 1 тонны CO₂ равной 25 долларов¹⁰.

Расходы на обслуживание $I_{\text{обслуж.}}$ (включая сервисное производителей оборудования) приняты равными 5 тыс. долларов в год. Учитывалось, что источники во всех вариантах работают в автоматизированном режиме и не требуют постоянного присутствия персонала. Периодическое контролирование параметров работы может быть поручено специалистам по обслуживанию сети отопления и электроснабжения здания.

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4. – Результаты расчетов ежегодных эксплуатационных расходов, тыс. долл. США

Варианты	I_{Σ}	в том числе					
		$I_{\text{энерг.}}$		I_a	$I_{\text{тек.рем.}}$	$I_{\text{экол.}}$	$I_{\text{обслуж.}}$
		Всего	в т.ч. за тепловую энергию от ТЭЦ				
Вариант 1	34,2	12,3	4,8	13,8	1,4	1,7	5,0
Вариант 2	40,0	21,8	17,8	8,5	0,9	3,8	5,0
Вариант 3	40,6	26,3	20,5	6,1	0,6	4,6	3,0
Вариант 4	35,0	20,7	20,1	4,9	0,5	3,9	5,0
Вариант 5	36,4	16,7	6,8	11,2	1,1	2,4	5,0

С использованием данных табл. 2.3 и 3.4, определена себестоимость выработки тепловой энергии теплогенерирующим оборудованием местных источников: для варианта 1 – 38,1 долл./Гкал; варианта 2 – 51,7 долл./Гкал; варианта 3 – 56,1 долл./Гкал; варианта 4 – 40,4 долл./Гкал; варианта 5 – 41,6 долл./Гкал.

Комплексное сравнение рассматриваемых источников отопления и горячего водоснабжения, как объектов нового строительства, выполняется по методу приведенных затрат на теплоснабжение, т.к. рассматриваемые варианты различаются как по капитальным вложениям на их реализацию, так и по величине ежегодных эксплуатационных расходов на выработку тепловой энергии.

Соизмерение этих разных значений осуществляется с помощью метода приведенных затрат:

$$Z_a = P_b K_a + I_a,$$

где Z_a - величина приведенных затрат на сооружение источника теплоснабжения; P_b - средний банковский процент (10%), принимается равным 0,1; I_a - ежегодные эксплуатационные расходы; K_a - суммарные капитальные вложения на сооружение источников теплоснабжения.

Результаты технико-экономических расчетов, выполненные по формуле приведенных затрат ($Z_a = P_b K_a + I_a$), приведены в таблице 3.5.

¹⁰ - в США и странах ЕС расходы на снижение эмиссии 1 т углекислого газа определены в 150...300 долл., в России – 10...25 долл.

Таблица 3.5. – Результаты технико-экономического сравнения вариантов строительства и работы альтернативных источников отопления и горячего водоснабжения жилого дома

Варианты	Z_{Σ}		K_{Σ} (см. табл. 3.3)		I_{Σ} (см. табл.3.4)	
	тыс. долл.	%	тыс. долл.	%	тыс. долл.	%
Вариант 1	48,0	100	137,8	100	34,2	100
Вариант 2	48,5	101,0	85,3	66,7	40,0	117,0
Вариант 3	46,6	97,1	60,6	44,0	40,6	118,7
Вариант 4	39,9	83,1	48,5	35,2	35,0	102,3
Вариант 5	47,6	99,2	112,1	81,3	36,4	106,4

Анализ выше приведенных значений основных технико-экономических показателей показал, что рассматриваемые варианты различаются по техническим (см. табл. 3.1-3.3), экологическим (см. табл.3.2), и экономическим показателям (см. табл.3.3-3.5).

По основным количественным показателям эффективности рассматриваемые альтернативные источники отопления и горячего водоснабжения жилого дома можно расположить в следующей последовательности:

- по расходу первичного топлива на отопление и горячее водоснабжение (энергетической эффективности):
вариант 1→вариант 5→вариант 2→вариант 4→вариант 3;
- по меньшему объему выбросов CO₂ от сжигания топлива на Могилевской ТЭЦ-2 (экологическая эффективность):
вариант 1→вариант 5→вариант 2→вариант 4→вариант 3;
- по минимуму приведенных затрат на строительство альтернативных источников:
вариант 4→вариант 3→вариант 2→вариант 1→вариант 5;
- по минимуму единовременных капитальных вложений на строительство:
вариант 4→вариант 3→вариант 2→вариант 5→вариант 1;
- по минимуму ежегодных эксплуатационных расходов и себестоимости выработки тепловой энергии теплогенерирующим оборудованием местных источников:
вариант 1→вариант 4→вариант 5→вариант 2→вариант 3.

В таблице 3.6 приведена оценка вариантов по другим показателям, влияющим на экономичность и надежность работы альтернативных источников отопления и горячего водоснабжения.

Таблица 3.6. – Результаты оценки* альтернативных источников отопления и горячего водоснабжения жилого дома по качественным показателям

Наименование показателей	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Зависимость от погодных условий	±	+	–	+	–
Зависимость от привычек жильцов	±	+	+	+	±
Возможности диверсификации источников и видов первичных энергоресурсов	+	±	–	–	+
Зависимость от отключений тепловых сетей на профилактику, ремонт или реконструкцию	–	+	+	+	–
Зависимость от тепловых сетей по дате включения / отключения отопления	–	–	+	+	–

* + - да; – - нет

Как видно из табл. 3.6, лучшим по приведенным качественным показателям является вариант 5.

Системный анализ, основанный на учете возможного изменения цен и тарифов на топливо, электрическую и тепловую энергию, стабильности ресурсов местных источников низкопотенциальной теплоты, затрат на обслуживание и др. (см. табл.3.1-3.6), дает основание рассматривать как конкурентные для принятия решения о проектировании варианты 4 и 5.

Представленные в разделе 3 расчеты и выводы подлежат уточнению при конкретизации расчетных тепловых нагрузок жилого дома, параметров источников низкопотенциальной теплоты и др., которые выполняются на стадии проектирования.

4 Расчет эффективности местных источников отопления и горячего водоснабжения пилотного жилого дома

Эффективность применения рекомендуемых для проектирования местных источников отопления и горячего водоснабжения в сравнении с теплоснабжением только от Могилевской ТЭЦ-1 определяется по:

- расходу первичного топлива (энергетический эффект);
- объемам выбросов парниковых газов (экологический эффект);
- величине единовременных капитальных вложений на строительство местного теплоисточника (интересы застройщика);
- величине ежегодных эксплуатационных затрат на отопление и горячее водоснабжение (интересы потребителей жилого дома).

Результаты сравнения, основанные на данных раздела 3, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Результаты технико-экономического сравнения эффективности источников отопления и горячего водоснабжения жилого дома

Варианты	Q ^{год} , Гкал	Расход первичного топлива, т у.т./год	Объемы выбросов СО ₂ , тонн	Единове- ренные капвложения, тыс. долл.	Эксплуатационные расходы, тыс. долл./год	
					Всего	в т.ч. за электри- чество и тепловую энергию
Отопление и горячее водоснабжение по варианту 4	889,3	90,1*/92,5**	157,3	48,5	35,0***	20,7
Отопление и горячее водоснабжение по варианту 5	-“-	68,2*/55,6**	94,5	112,1	37,4***	16,7
Отопление и горячее водоснабжение от Могилевской ТЭЦ-2	-“-	155,4*/149,8**	264,2	-	34,3***	34,3

* - удельный расход топлива на выработку 1 МВтч – 162,8 кг у.т. и на выработку 1Гкал – 174,8 кг у.т. на Могилевской ТЭЦ-1 после ее реконструкции (см. табл.1.1);

** - удельный расход топлива на выработку 1 МВтч – 254,9 кг у.т. и на выработку 1 Гкал – 168,4 кг у.т. на энергоисточниках Белорусской энергосистемы;

*** - тариф на электроэнергию – 65,7 долл. за МВт-ч; тариф на тепловую энергию – 38,6 долл. за Гкал (см. табл.1.1);

Как следует из табл.4.1 расходы первичного топлива на отопление и горячее водоснабжение жилого дома с применением местных теплогенерирующих источников (варианты 4 и 5) значительно меньше, чем только от Могилевской ТЭЦ-1. Значительно

меньше и выбросы загрязняющих веществ при сжигании топлива в окружающую среду г. Могилева.

Можно рассчитывать, что при учете качественных преимуществ выработки тепловой энергии на местных теплоисточниках (см. табл.3.6) и ожидаемом снижении тарифа на электроэнергию, расходуемую на привод энергосберегающего и экологически чистого оборудования, особенно после ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС, эксплуатационные расходы будут снижаться.

Заключение

1. Тепловая нагрузка энергоэффективного пилотного жилого дома в расчетных условиях ($t_{p.} = \text{минус } 24^{\circ}\text{C}$, $t_{вн} = +18^{\circ}\text{C}$, $t_{хол.воды} = 5^{\circ}\text{C}$) составляет 236,4 кВт, в т. ч. отопление – 155 кВт, средняя суточная нагрузка системы горячего водоснабжения в отопительный период – 81,4 кВт. Объем годового теплопотребления жилым домом составляет 889,3 Гкал, в т. ч. отопление – 303 Гкал, горячее водоснабжение – 342,7 Гкал.
2. Для отопления и ГВС жилого дома могут быть использованы местные источники низкопотенциальной теплоты: городские сточные воды из канализационного коллектора d800, «серые» сточные воды жилого дома и солнечная энергия. Возможный к использованию средний суточный тепловой потенциал городских сточных вод составляет около 100 Гкал, «серых» сточных вод жилого дома – 1,5 Гкал, солнечной энергии – условно неограниченный.
3. Структурированы пять альтернативных местных теплоисточников для отопления и ГВС жилого дома, отличающиеся видом и участие теплогенерирующего оборудования в покрытии тепловых нагрузок и теплопотребления жилого дома. Во всех вариантах предусматривается потребление тепловой энергии из тепловой сети от ТЭЦ (см. раздел 2).
4. Обоснован выбор для конкретизации при разработке проектных решений вариантов местного энергоэффективного источника отопления и горячего водоснабжения жилого дома на основе гелиоустановки и блока «серых» сточных вод по варианту 4 и тепловых насосов, использующих теплоту городских сточных вод, и блока «серых» сточных вод по варианту 5. Главные различия рекомендуемых вариантов: участие в покрытии теплопотребления – 41,5% и 74,2%; объемы единовременных капитальных вложений на строительство – 48,5 тыс. долл. и 112,1 тыс. долл.; расходы первичного топлива – 92,5 т у.т. и 55,6 т у.т.
5. Значения основных показателей отопления и горячего водоснабжения на основе местных теплоисточников (варианты 4 и 5) в сравнении с теплоснабжением от Могилевской ТЭЦ-1:
 - экономия первичного топлива – 57,3 т у.т./год (вариант 4) и 94,2 т у.т./год (вариант 5);
 - сокращение объемов выбросов CO_2 – 106,9 тонн/год и 169,7 тонн/год;
 - практически одинаковые эксплуатационные расходы и стоимость выработки тепловой энергии.
6. С учетом более высокой энергетической и экологической эффективности считаем целесообразным рекомендовать для проектирования местный энергоэффективный источник отопления и горячего водоснабжения пилотного жилого дома на основе применения тепловых насосов, использующих теплоту городских сточных вод, и блока «серых» сточных вод (вариант 5).

Список используемых источников

1. Строительная климатология (СНБ 2.04.05 – 2000). Минск, 2001.
2. Рекомендации по проектированию систем теплоснабжения, отопления и горячего водоснабжения пилотных жилых многоквартирных зданий с применением солнечных коллекторов. Предложения по совершенствованию норм строительного проектирования в области гелиосистем теплоснабжения зданий (этап 3). Минск, 2014.
3. Справочник по климату СССР. Выпуск 7. Температура воздуха и почвы. Гидрометеоздат, М.,1965.
4. www.energeo.by