

1. ОБЩИЕ ДАННЫЕ

1.1. Перспективы использования различных возобновляемых источников тепловой энергии

В суммарном энергопотреблении развитых стран (США, Германия, Япония и т.д.) доля расходуемой на обогрев и кондиционирование для жилых домов тепловой энергии составляет приблизительно 86% от общей потребности в энергии. При этом только лишь на отопление расходуется приблизительно 75% от общей потребности энергии (рис. 1).

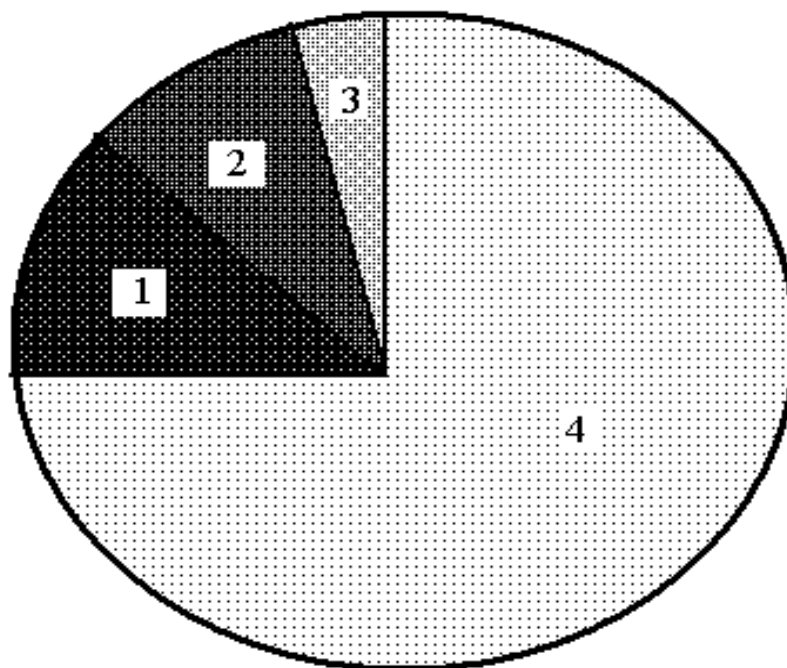


Рис. 1. Структура потребления энергии

домохозяйствами в развитых странах

1– горячая вода для бытовых нужд (11%); 2– бытовые электрические приборы, в том числе кондиционеры (12%); 3– освещение (2%); 4– тепло для обогрева помещений (75%).

Примечание. При написании настоящего раздела использованы данные [1] и [14]

В настоящее время эта потребность покрывается большей частью за счёт газа и нефти. Так как наличие этих ископаемых энергоносителей ограничено и они относятся к невозобновляемым, то их стоимость постоянно возрастает. В этой связи развитие теплоэнергетики в настоящее время идет по таким двум основным направлениям:

- снижение потребления энергии;
- использование возобновляемых (иногда их называют альтернативными) источников энергии.

В промышленно-развитых странах процесс снижения потребления энергии происходит на законодательном уровне.

Например, в Германии, начиная с 1977 года, законодательство уже определяло граничные параметры отопительных приборов и ограждающих конструкций зданий и сооружений в разнообразных предписаниях по теплозащите и рациональному использованию тепловой энергии.

В конечном итоге, на государственном уровне было принято обязательное для исполнения всеми субъектами хозяйственной деятельности «Положение об обеспечении энергосберегающей тепловой защиты и применения энергосберегающих приборов и оборудования в зданиях (*EnEV*)». Суть этого положения заключается в том, что законодательно был создан единый свод правил, ограничивающий годовой расход первичной энергии на отопление и горячее водоснабжение (*ГВС*) – в зависимости от типа здания – от 80 до 140 $\text{кВт} \cdot \text{час}$ на 1 м^2 обогреваемой полезной площади в год (рис. 2). Это положение было принято к исполнению с 01.02.2002 и действует в настоящее время.

Для сопоставления отметим, что на Украине и практически всех остальных странах СНГ на нужды отопления расходуется приблизительно 600 $\text{кВт} \cdot \text{час}$ на 1 м^2 обогреваемой полезной площади в год. При этом если, например, для России такая норма потребления не является

критичной (ввиду богатства природными энергетическими ресурсами), то для Украины такая норма потребления электрической энергии близка к катастрофичной.

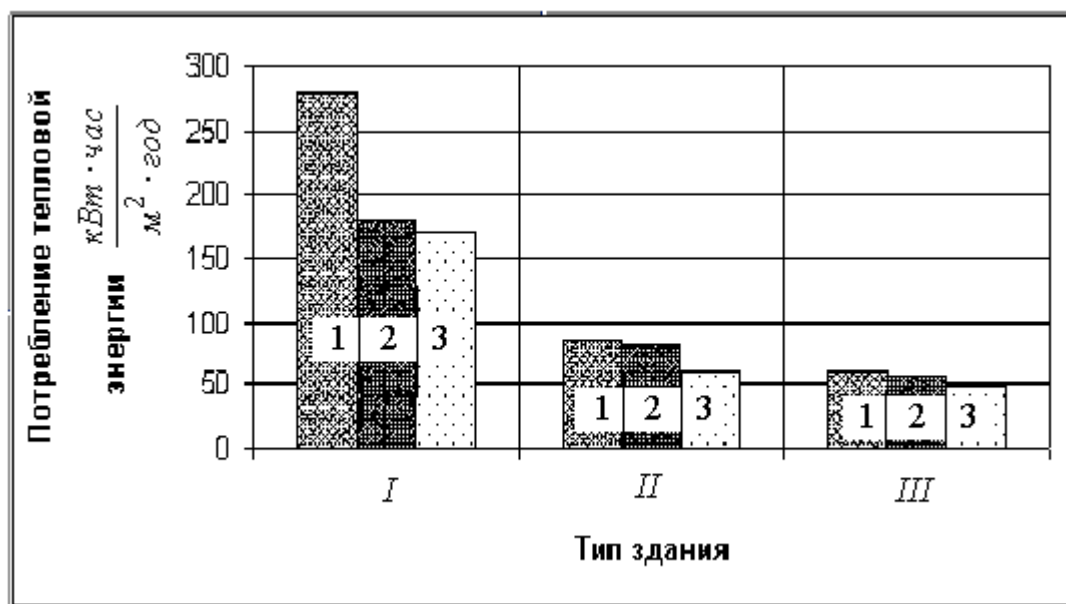


Рис. 2. Структура потребления тепловой энергии в Германии.

I— дом рядовой застройки; II— односемейный дом; III— многоквартирный дом.

Примечание На рисунке 2 приняты такие обозначения:

1— жилой фонд; 2— здания, спроектированные в соответствии с требованиями положения о теплозащите; 3— энергосберегающий дом

Далее проанализируем эффективность использования для нужд отопления основных регенеративных источников энергии, которые получили наибольшее распространение в настоящее время.

Основными возобновляемыми (т.е. регенеративными) источниками в настоящее время энергии являются:

— лучистая энергия Солнца;

- энергия ветра;
- энергия движущейся воды;
- тепловая подземная энергия, обусловленная нагревом верхней части земной коры энергией Солнца;
- тепловая подземная энергия, обусловленная происходящими в нижней части земной коры и мантии физико-химическими процессами;
- энергия сгорания растений.

Необходимо отметить, что каждому из перечисленных источников возобновляемой энергии соответствует та или иная область земной поверхности. Например, для использования энергии движущейся воды наиболее приемлемы горные районы (они характеризуются большими перепадами высот и как следствие – высокой потенциальной и кинетической энергией горных рек), побережья морей и океанов и т.д. При этом использование лучистой энергии Солнца целесообразно в районах с прозрачной атмосферой и значительным числом безоблачных дней. Поэтому в ходе анализа перспективности получения того или иного источника энергии вся территория Украины условно была разбита на такие районы:

- Карпаты;
- Крым;
- промышленные районы;
- сельскохозяйственные районы;
- побережья Азовского и Черного морей.

Эти данные сведены в таблицу 1, в которой указана краткая характеристика каждого из перечисленных районов Украины на предмет получения возобновляемой энергии.

Таблица 1

Характеристика различных районов Украины на предмет наличия в них источников возобновляемой энергии

№ <i>п.п.</i>	Наименование района	Характеристика района	
		Достоинства	Недостатки
1	2	3	4
1	Карпаты	Горные реки; высокая скорость ветра; прозрачная атмосфера; начиная с некоторой глубины – круглогодично положительная температура основания	Сезонные паводки; частые дожди; недостаток растительных остатков, пригодных для получения энергии
2	Крым	Большое количество солнечных дней, на побережье – высокая скорость ветра; начиная с некоторой глубины – круглогодично положительная температура основания	Недостаток растительных остатков, пригодных для получения энергии
3	Промышленные районы	Начиная с некоторой глубины – круглогодично положительная температура основания	Непрозрачная атмосфера, низкая и средняя скорость ветра

Продолжение таблицы 1

№ <i>п.п.</i>	Наименование района	Характеристика района	
		Достоинства	Недостатки
1	2	3	4
4	Сельско- хозяйствен- ные районы	Избыток растительных остатков, пригодных для получения энергии; начиная с некоторой глубины—круглого- дично положительная температура основания	Низкая и средняя скорость ветра, относительно малое число солнечных дней
5	Побережья Азовского и Черного морей	Высокая скорость ветра; прозрачная атмосфера; начиная с некоторой глубины— круглогодично положительная температура основания	Недостаток растительных остатков, пригодных для получения энергии

Примечание. Настоящую таблицу рассматривать с таблицей 2.

На основе представленных в таблице 1 данных можно сделать вывод о том, что каждому из рассмотренных нами районов соответствует свой источник возобновляемой энергии (таблица 2). При этом для всех рассмотренных районов Украины общим источником возобновляемой энергии являются грунтовые тепловые насосы. Это свидетельствует о перспективности их применения на всей территории Украины. Последний факт имеет косвенное подтверждение в том смысле, что грунтовые тепловые насосы получили широкое распространение в промышленно-развитых странах, климат которых является близким к

климату Украины (Австрия, Германия, Словения, юг Швеции и другие страны).

Таблица 2

Наиболее перспективные источники возобновляемой энергии для различных районов Украины

№ <i>п.п.</i>	Наименование района	Источник энергии
1	2	3
1	Карпаты	Мини- гидроэлектростанции; ветроэлектростанции, тепловые насосы
2	Крым	Мини-гидроэлектростанции; солнечные батареи ветроэлектростанции, тепловые насосы
3	Промышленные районы	Тепловые насосы
4	Сельскохозяйст- венные районы	Тепловые электростанции, работающие на растительных остатках, реакторы биогаза и синтез-газа, тепловые насосы
5	Побережья Азовского и Черного морей	Солнечные батареи, ветроэлектростанции, тепловые насосы

Примечание. Настоящую таблицу рассматривать с таблицей 1

Далее рассмотрим известные в настоящее время способы извлечения тепловой энергии из верхней части земной коры, в том числе с использованием грунтовых тепловых насосов.

- Прямой обогрев зданий (как правило, промышленных и

складских помещений) без использования тепловых насосов за счет подземного тепла и циркуляции теплоносителя.

- Прямое кондиционирование зданий без использования тепловых насосов за счет подземного холода и циркуляции теплоносителя.

- Окончательный нагрев воды для бытовых целей с использованием теплового насоса.

- Переход на более высокий температурный уровень с использованием теплового насоса (т.е. предварительный подогрев воды).

- Использование тепловых насосов для нужд отопления.

- Использование тепловых насосов для нужд кондиционирования.

- Использование тепловых насосов в реверсном режиме (т.е. для нужд отопления и кондиционирования одновременно).

- Использование для прямого отопления теплых стоков, речной и морской воды без применения тепловых насосов.

- Использование для прямого охлаждения речной и морской воды без применения тепловых насосов.

Далее остановимся на способах извлечения геотермального (глубинного) тепла. В зависимости от схемы действия отопительной системы, вида основания и температуры грунтовой воды различают такие варианты отбора грунтового тепла:

- извлечение геотермальной энергии из грунтовой толщи непосредственно, без использования тепловых насосов (этот вариант отопления обычно используют в странах с высокой вулканической активностью, например, в Исландии);

- сезонное накопление тепловой энергии с тем, чтобы ее использовать в холодное время года;

- накопление в основании холода с тем, чтобы использовать накопленную таким образом энергию для нужд кондиционирования;

- реверсный нагрев и охлаждение основания (в этом случае накопленная летом тепловая энергия зимой используется для нужд отопления здания, а охлажденное за счет отбора тепловой энергии зимой для нужд отопления основание используется для нужд кондиционирования летом).

Далее для понимания необходимости прогнозирования тепловых полей в грунтовых основаниях познакомимся с принципами функционирования тепловых насосов. Эти данные представлены в разделе 1.2.

1.2. Принципы функционирования теплового насоса

Для понимания основного принципа функционирования теплового насоса воспользуемся аналогией. Поставим условное соответствие между теплом и водой. Точно так же, как вода не течёт вверх, тепло всегда перетекает только от горячего тела (источника тепла) к холодному телу (приёмнику тепла) [2]. Для того чтобы использовать энергию воды, мы должны поднять ее на некоторый уровень (для этой цели сооружают плотины). Аналогичным образом для того, чтобы использовать для отопления и получения для бытовых нужд горячей воды низкопотенциальное тепло из окружающей среды, т.е. из грунта, или грунтовых вод, необходимо это тепло «перекачать» или «поднять» на более высокий уровень.

Для этой «перекачки» используется физическое **явление фазовых переходов жидкости в газообразное состояние** и наоборот – **газа в жидкость** [2, 9]. В качестве рабочего тела, позволяющего осуществлять такие фазовые переходы используют специальные жидкости, которые называют **хладагентами**. Их основной отличительной чертой от остальных жидкостей является относительно низкая температура кипения

и переход в жидкое состояние при относительно низких значениях давления.

Таким образом, «сердцем» теплового насоса является циркуляционный контур, заполненный хладагентом и включающий в себя конденсатор и компрессор. Принципиальная схема теплового насоса представлена на рисунке 3.

Принцип действия и конструкции представленного на рис. 3. теплового насоса полностью идентичен контуру хладагента холодильников. Эти устройства испытаны временем и практикой использования и очень надежны. Поэтому тепловые насосы по надежности также сопоставимы холодильными установками.

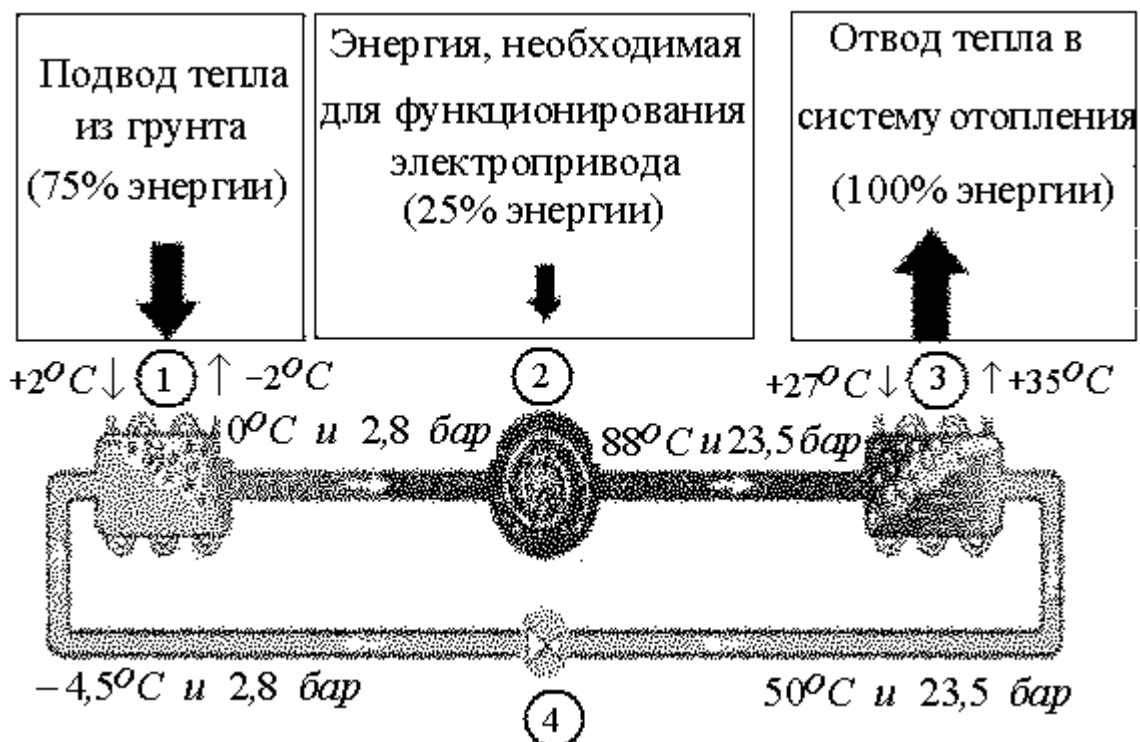


Рис. 3. Принципиальная схема теплового насоса, работающего на хладагенте R407C

1– испаритель; 2– компрессор; 3– конденсатор; 4– расширительный клапан

Однако необходимо отметить, что назначения теплового насоса и холодильника диаметрально противоположны: внутри холодильника тепло отбирается у охлаждаемых продуктов и рассеивается в окружающей среде (т.е. помещении, в котором находится холодильник), а тепловой насос отбирает тепло из окружающей среды (т.е. воды, или земли, или воздуха) и передаёт его в отопительную систему. При этом происходит охлаждение окружающей среды (т.е. воды, или земли, или воздуха) путем отбора из нее тепловой энергии.

В закрытом контуре теплового насоса происходит поочерёдное испарение, сжатие, конденсация (сжижение) и расширение рабочего вещества – хладагента, закипающего уже при невысокой температуре (рис. 3). Далее рассмотрим основные элементы теплового насоса.

1. Испаритель (позиция 1 на рисунке 3). В испарителе находится жидкий хладагент под воздействием низкого давления. Температура хладагента ниже, чем температура источника тепла (основания). Поэтому тепло от источника тепла передаётся хладагенту, что приводит к его испарению.

2. Компрессор (позиция 2 на рисунке 3). Газообразный хладагент из конденсатора поступает в компрессор. Там он сжимается за счет высокого давления (последнее создается с использованием компрессора) и при этом настолько сильно нагревается, что температура хладагента после компрессии становится несколько выше температуры, необходимой для отопления и горячего водоснабжения. Кроме того, тепловая энергия привода компрессора тоже преобразуется в тепло, которое также расходуется на подогрев хладагента.

3. Конденсатор (позиция 3 на рисунке 3). Очень горячий хладагент высокого давления поступает в конденсатор. Там он отдаёт всё своё тепло (то есть тепло, полученное от источника тепла, и тепло, полученное от привода компрессора) в систему отопления. Это достигается за счет

перепада тепловых потенциалов). При этом газообразный хладагент сильно охлаждается и вновь превращается в жидкость.

4. Расширительный клапан (позиция 4 на рисунке 3). Назначение этого элемента теплового насоса – понижение давления в хладагенте. После прохождения через расширительный клапан хладагент снова возвращается в испаритель. Цикл завершился.

Тепловые насосы имеют различную конструкцию, а следовательно, различные рабочие параметры. Поэтому для оценки эффективности их работы используют такие характеристики, как **коэффициент мощности** и **коэффициент эффективности**. Методики определения этих характеристик представлены в разделе 1.3.

1.3. Коэффициенты мощности (ε), преобразования энергии (COP) и эффективности (β)

Соотношение между полезной тепловой мощностью теплового насоса, расходуемой на нагрев, и использованной мощностью электропривода компрессора называют **коэффициентом мощности**. Его обозначают символом « ε » и определяют с использованием такой эмпирической формулы:

$$\varepsilon = 0,5 \cdot \frac{T}{T - T_0} = 0,5 \cdot \frac{T}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T}, \quad (1)$$

где ε – коэффициент мощности теплового насоса; T – абсолютная температура приемника тепла (т.е. обогреваемого помещения) в градусах Кельвина [K]; T_0 – абсолютная температура источника тепла в градусах Кельвина [K]; ΔT – разность между температурами приемника и источника 0,5 – эмпирический коэффициент пропорциональности.

Коэффициент мощности, достигаемый тепловым насосом, зависит от разницы температур источника и приёмника тепла, а также от температуры приемника тепла. Анализ формулы (1) позволяет сделать такие выводы.

1. Чем меньше разность температур источника и приемника тепла и чем больше температура приемника тепла, тем выше коэффициент мощности ε .
2. Чем меньше разность температур источника и приемника тепла и чем больше температура источника тепла, тем выше коэффициент мощности ε .

В графической форме зависимость коэффициента мощности ε от температуры источника тепла T_0 и температуры приемника тепла T представлена на рисунке 4.

Также представляет интерес зависимость коэффициента мощности ε от разности температур температуры приемника тепла T и источника тепла T_0 (рис 5).

Далее проиллюстрируем формулу (1) и графики на рисунках 4 и 5 конкретными примерами. В первом случае рассмотрим вариант отопления здания с использованием радиатора (батареи) с температурой 50°C и температурой источника тепла (основания) 0°C .

Имеем:

$$T_0 = 273 + 0 = 273 \text{ K}; T = 273 + 50 = 323 \text{ K},$$

$$\text{откуда } \Delta T = T - T_0 = 323 - 273 = 50 \text{ K}$$

$$\text{и } \varepsilon_1 = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{50 + 273}{50} = 3,23.$$

Таким образом, в данном конкретном случае на один киловатт·час

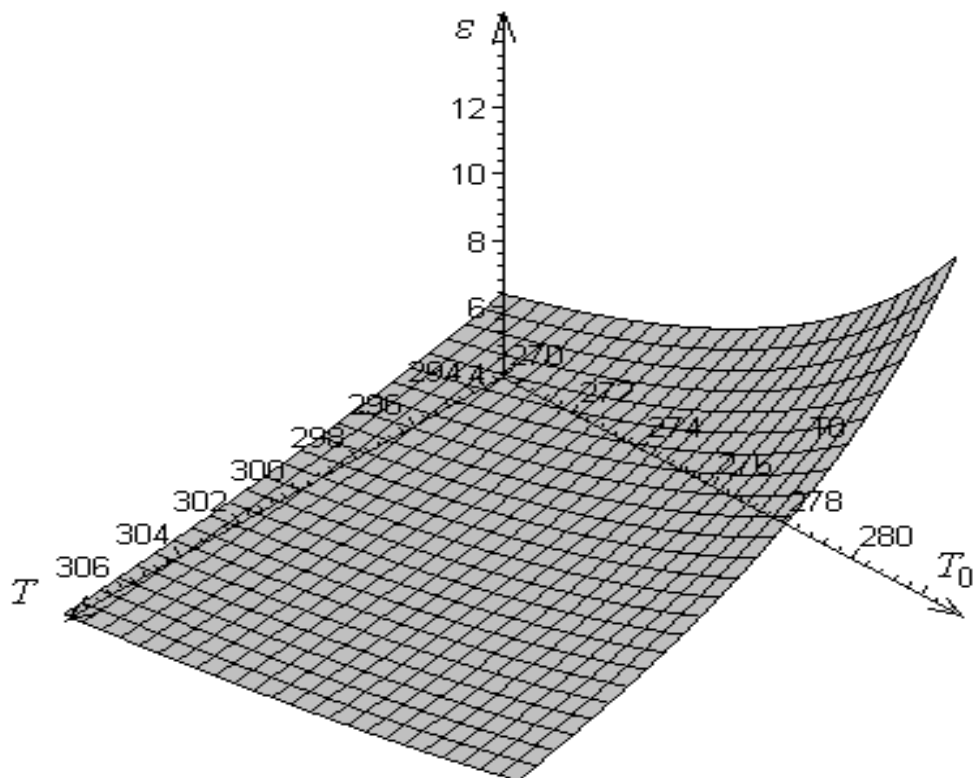


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности ε от температуры источника тепла T_0 и температуры приемника тепла T

затраченной на работу компрессора энергии удалось «выкачать» из основания 3,23 киловатт·часа тепловой энергии.

Во втором случае рассмотрим вариант отопления здания с использованием распределенного источника обогрева (теплый пол) с температурой 35°C и температурой источника тепла (основания) 0°C .

Имеем:

$$T_0 = 273 + 0 = 273^{\circ}\text{K}; T = 273 + 35 = 308^{\circ}\text{K},$$

$$\text{откуда } \Delta T = T - T_0 = 308 - 273 = 35^{\circ}\text{K}$$

$$\text{и } \varepsilon_2 = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{35 + 273}{35} = 4,4.$$

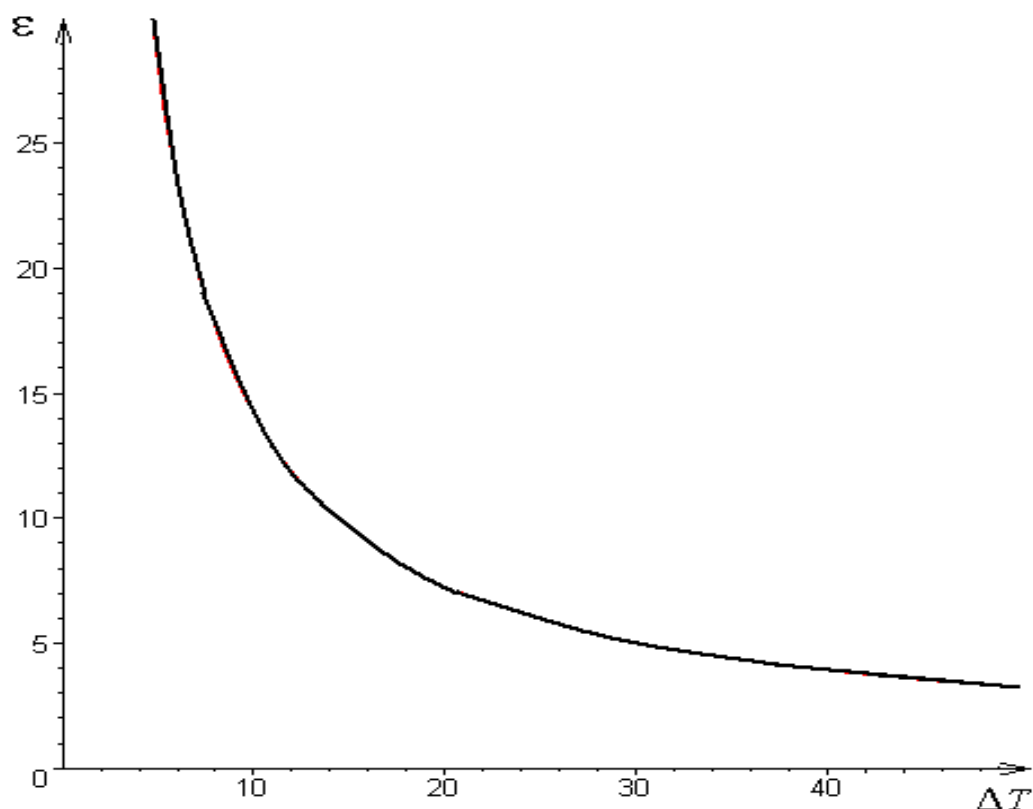


Рис. 5. зависимость коэффициента мощности ε от разности температур приемника тепла T и источника тепла T_0 $\Delta T = T - T_0$.

Примечание. При построении настоящего графика в качестве температуры источника тепла принята температура $T_0 = 273 \text{ K}$

Таким образом, в данном конкретном случае на один киловатт·час затраченной на работу компрессора энергии удалось «выкачать» из основания 4,4 киловатт·часа тепловой энергии.

Далее найдем относительную погрешность между коэффициентами мощности, установленными в первом и втором случаях. Имеем:

$$\Delta = \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{3,23 - 4,4}{4,4} \right| \cdot 100\% = 36\%.$$

Таким образом, отопление здания по схеме «теплый пол» в данном конкретном случае оказалось на 36% эффективнее чем радиаторное отопление.

В третьем случае рассмотрим вариант отопления здания с использованием распределенного источника обогрева (теплый пол) с температурой 35°C и температурой источника тепла (основания) 10°C .

Имеем:

$$T_0 = 273 + 10 = 283 \text{ K}; T = 273 + 35 = 308 \text{ K},$$

$$\text{откуда } \Delta T = T - T_0 = 308 - 283 = 25 \text{ K}$$

$$\text{и } \varepsilon_3 = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{25 + 283}{25} = 6,16.$$

Таким образом, в данном конкретном случае на один киловатт·час затраченной на работу компрессора энергии удалось «выкачать» из основания 6,16 киловатт·часа тепловой энергии.

Далее найдем относительную погрешность между коэффициентами мощности, установленными в первом и третьем случаях. Имеем:

$$\Delta = \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{3,36 - 6,16}{3,36} \right| \cdot 100\% = 83,3\%.$$

Таким образом, отопление здания по схеме «теплый пол» и повышение температуры основания в данном конкретном случае оказалось на 83,3% эффективнее чем радиаторное отопление при более низкой температуре основания.

В заключение отметим, что существует такое эмпирическое (опытное) правило: **«уменьшение на 1° температуры источника**

обогрева обеспечивает увеличение его коэффициента мощности приблизительно на 2,5%».

Коэффициент мощности ε отображает соотношение между полезной тепловой мощностью, расходуемой на нагрев, и использованной электрической мощностью привода компрессора. Иногда его называют **коэффициентом преобразования COP** (от англ. Coefficient Of Performance), который определяют по формулам вида

$$\varepsilon = COP = 0,5 \cdot \frac{T}{T - T_0} = 0,5 \cdot \frac{T}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{P_h}{Pel}, \quad (2)$$

здесь ε, T, T_0 – см. пояснения к формуле (1); COP – коэффициент преобразования энергии; P_h – мощность, используемая для обогрева; Pel – потребляемая электрическая мощность.

Чтобы иметь возможность для сопоставления тепловых насосов различных конструкций, стандарт DIN EN 255 оговаривает такие параметры:

- вид источника тепла;
- эталонная температура источника тепла;
- потребляемая мощность привода вспомогательных агрегатов;
- значение коэффициента преобразования.

При этом для характеристики тепловых насосов используются аббревиатуры вида:

- BT_0 / WT – для рассольно–водяных тепловых насосов;
- WT_0 / WT – для водо–водяных тепловых насосов;
- AT_0 / WT – для воздушно–водяных тепловых насосов.

Первая группа символов (слева от косой черты), представленных выше аббревиатур, характеризует вид теплоносителя и его температуру, а вторая группа символов (справа от косой черты) – вид теплоносителя, задействованного в тепловом насосе, и его температуру. При этом литера

«В» означает «Рассол» (от *англ.: Brine*), литера «W» – «Вода» (от *англ.: Water*), литера «А» – «Воздух» (*англ.: Air*). Цифры указывают на соответствующие температуры в градусах Цельсия.

В таблице 3 представлены характеристики наиболее распространенных видов тепловых насосов, использующих тепло грунта (1), воды (2) и воздуха (3).

Таблица 4

Характеристики наиболее распространенных тепловых насосов

1. Рассольно-водяные тепловые насосы		
B0/W35	B0/W50	B5/W50
2. Водно-водяные тепловые насосы		
W10/W35	W10/W50	W15/W50
3. Воздушно-водяные тепловые насосы		
A7/W35	A7/W50	A15/W50

В частности, аббревиатура B0/W35 свидетельствует о том, что соответствующий ей рассольно-водяной тепловой насос использует тепло рассола при минимальной его температуре, равной $T_0 = 0^\circ C$ и при этом на выходе температура предназначенной для отопления воды равна $T_0 = 35^\circ C$.

При этом аббревиатура A7/W50 свидетельствует о том, что соответствующий ей воздушно-водяной тепловой насос использует тепло воздуха при минимальной его температуре, равной $T_0 = 7^\circ C$ и при этом на выходе температура предназначенной для отопления воды равна $T_0 = 50^\circ C$.

В заключение отметим, что нормы EN 255 при указании коэффициента мощности, наряду с потребляемой мощностью компрессора

требуют учитывать также и долевую часть мощности рассольного насоса (для рассольно-водяных тепловых насосов) или долевую часть мощности водяного насоса (для рассольно-водяных тепловых насосов) или долевую часть мощности вентилятора (для воздушно-водяных тепловых насосов). Кроме того, следует разграничивать аппараты с встроенными насосами и аппараты без встроенных насосов.

В качестве дополнения к коэффициенту мощности следует также использовать т.н. коэффициент эффективности, который характеризует эффективность работы отопительного прибора за некоторый период времени. На практике, как правило, используют **годовой коэффициент эффективности** (англ.: *seasonal performance factor*). Этот коэффициент отображает соотношение между полезным теплом, произведенным тепловым насосом в течение одного года, к суммарной электрической работе, затраченной на его функционирование. Его обозначают символом « β » и рассчитывают по формуле:

$$\beta = \frac{Q_{wp}}{W_{el}}, \quad (3)$$

где:

β – **годовой коэффициент эффективности**;

Q_{wp} – количество теплоты, отданное тепловым насосом в течение одного года (измеряется в [кВт·час]);

W_{el} – количество электрической энергии, потреблённое тепловым насосом в течение одного года (измеряется в [кВт·час]).

В соответствии с DIN V 4701-10 для теплового насоса необходимо также применять **методику энергетической оценки** различных технологий и определять так **называемые коэффициенты затрат теплового насоса**.

Эти коэффициенты позволяют определить **расход невозобновляемой энергии**, необходимой для решения той или иной задачи (в рассматриваемом случае задачи отопления здания или сооружения).

Для теплового насоса годовой коэффициент затратности e_g следует определять по формуле:

$$e_g = \frac{1}{\beta} = \frac{W_{el}}{Q_{wp}}, \quad (4)$$

где:

e_g – коэффициент затратности

β – годовой коэффициент эффективности;

Q_{wp} – количество теплоты, отданное тепловым насосом в течение одного года (измеряется в [кВт·час]);

W_{el} – количество электрической энергии, потреблённое тепловым насосом в течение одного года (измеряется в [кВт·час]).

На основе Директивы 4650 Союза Немецких Инженеров (VDI) создана методика, с помощью которой можно пересчитать коэффициенты мощности, получаемые в результате стендовых испытаний тепловых насосов с учётом различных эксплуатационных параметров, на годовой коэффициент эффективности для различных случаев их практического применения.

В настоящее время также имеется специальное программное обеспечение, которое путём имитационных расчётов позволяет получать очень точные результаты.

Проиллюстрируем изложенное на конкретном примере. Допустим, что на отопление дома на одну семью расходуется 12000 кВт·час в год. Требуется найти ответы на такие вопросы.

Сколько регенерируемой энергии позволит получить грунтовый тепловой насос за 20 лет при коэффициенте затратности $e_g = 0,2$?

1. Сколько дизельного топлива пришлось бы потратить на обогрев данного дома, если бы его отопление осуществлялось традиционным способом?

Вначале рассчитаем количество тепла, необходимое для отопления в течение одного года.

Имеем:

$Q_{ges} = 12000 \text{ кВт} \cdot \text{час}$ – суммарное количество тепла, необходимое для отопления здания в течение одного года [кВт·час];

$e_g = 0,20$ – коэффициент затратности;

Q_{erde} – количество тепла, поставляемое грунтовым зондом [кВт·час];

Q_{el} – количество тепла, производимое электрическим путём [кВт·час].

Далее имеем:

$Q_{ges} = Q_{erde} + Q_{el}$ и $Q_{el} = e_g \cdot Q_{ges}$, откуда $Q_{ges} = Q_{erde} + e_g \cdot Q_{ges}$,

откуда $Q_{erde} = (1 - e_g) \cdot Q_{ges} = 12000 \cdot (1 - 0,20) = 9600 \text{ кВт} \cdot \text{час}$.

Поскольку один литр дизельного топлива позволяет получить при сжигании приблизительно $10 \text{ кВт} \cdot \text{час}$ тепловой энергии, то количество сэкономленных литров дизельного топлива (напомним, что оно относится к невозобновляемым источникам энергии) равно

$$V_{oil} = \frac{Q_{erde}}{10} = \frac{9600}{10} = 960 \text{ л} \approx 1 \text{ т}.$$

Далее сопоставим стоимость затраченной на отопление электрической энергии, необходимой для функционирования теплового насоса и дизельного топлива, которое необходимо сжечь для того, чтобы отопить дом, с учетом того, что $1 \text{ кВт} \cdot \text{час}$ стоит приблизительно 25 копеек, а 1 литр дизельного топлива – 8 гривен.

Имеем:

– стоимость электрической энергии равна

$$C_{el} = 0,24 \cdot Q_{el} = 0,24 \cdot (0,20 \cdot 12000) = 576 \text{ грн};$$

– стоимость электрической энергии равна

$$C_{oil} = 8 \cdot V_{oil} = 8 \cdot (12000 / 10) = 9600 \text{ грн}.$$

Для двадцати лет эксплуатации теплового насоса имеем:

– $Q_{ges} = 12000 \cdot 20 = 240000 \text{ кВт} \cdot \text{час}$ – суммарное количество тепла, необходимое для отопления здания в течение двадцати лет [кВт·час];

– $V_{oil} = 960 \cdot 20 = 19200 \text{ л} \approx 19 \text{ т}$ – количество сэкономленного дизельного топлива (напомним, что оно относится к невозобновляемым источникам энергии);

– $\Delta C = 20 \cdot (C_{oil} - C_{el}) = 20 \cdot (9600 - 576) = 180480 \text{ грн}$ – количество сэкономленных на отоплении здания (в случае использования для этой цели теплового насоса) денег.

Изложенное выше позволяет нам сделать такие выводы:

– использование теплового насоса в качестве отопительного прибора за 20 лет эксплуатации позволило сэкономить приблизительно 19 тонн дизельного топлива, которое относится к невозобновляемым источникам энергии;

– использование теплового насоса в качестве отопительного прибора за 20 лет эксплуатации позволило сэкономить на отоплении приблизительно 180 тысяч гривен;

В заключение отметим, что представленные выше оценки получены для действующих в Германии норм, а для условий Украины экономия будет значительно больше (это обусловлено тем, что Украинские нормы предусматривают затраты тепловой энергии на отопление в 2...3 раза большие, чем это принято в Германии).

Следует также отметить, что эффективность отопления с

использованием тепловых насосов зависит от режимов их эксплуатации. Этот вопрос будет рассмотрен в разделе 1.4.

1.4. Режимы эксплуатации тепловых насосов. Источники тепла

Тепловые насосы, предназначенные для отопления помещений в зависимости от различных факторов (например, грунтовых условий, наружной температуры и т.д.) могут эксплуатироваться самыми разнообразными способами. Выбор того или иного режима работы должен ориентироваться, прежде всего, на уже имеющиеся в здании или проектируемые системы теплоотдачи и на выбранный источник тепла. В этой связи различают такие режимы эксплуатации тепловых насосов:

- моновалентный;
- бивалентный;
- моноэнергетический.

При этом различают такие источники тепла [10, 15, 16, 17, 18]:

- грунтовые основания;
- водные источники (реки, озера, моря, океаны и т.д.);
- воздух.

1.4.1. Моновалентный режим работы систем отопления и горячего водоснабжения

При моновалентном режиме эксплуатации теплового насоса он покрывает всю потребность в тепле для отопления и горячем водоснабжении. Оптимальными для этой цели являются такие источники тепла, как грунт и грунтовые воды, так как эти источники тепла слабо зависят от наружной температуры воздуха и при определенных условиях поставляют вполне достаточно тепла даже при отрицательных

температурах на поверхности основания.

1.4.2. Бивалентный режим работы систем отопления и горячего водоснабжения

При бивалентном режиме работы систем отопления и горячего водоснабжения используются два источника тепла – собственно тепловой насос и вспомогательный генератор тепла (как правило, это жидкотопливный или газовый котел).

Эта система обычно используется в том случае, когда для отопления зданий и сооружений применяются воздушно–водные тепловые насосы (при их эксплуатации возникают проблемы при отрицательной температуре наружного воздуха).

В настоящее время эти системы получили незначительное распространение. Это обусловлено тем, что для их функционирования требуются два теплогенератора, что повышает стоимость и приводит к повышению сложности системы отопления и горячего водоснабжения в целом.

1.4.3. Моноэнергетический режим функционирования систем и горячего водоснабжения

При моноэнергетической эксплуатации энергетические пики перекрываются с помощью дополнительно встроенного термоэлектрического нагревателя (ТЭНа). Параметры ТЭНа следует выбирать таким образом, чтобы он мог бы при пиковых нагрузках обеспечивать как нужды приготовления горячей расходной воды, так и нужды отопления.

Моноэнергетический вид работы зарекомендовал себя как наиболее экономичная разновидность эксплуатации тепловых насосов, поскольку в этом случае можно существенно снизить мощность теплового насоса, а следовательно, снизить стоимость соответствующего теплового насоса.

В этом случае, однако, необходим точный расчет, в результате которого следует минимизировать расход невозобновляемой энергии ТЭНов.

1.4.4. Источники тепла

На наш взгляд, основное преимущество теплового насоса по сравнению с другими источниками тепла, использующими невозобновляемые источники энергии, заключается в возможности его функционирования в **реверсном режиме**. Иными словами, в данном случае имеет место долговременное потребление бесплатного регенерируемого тепла окружающей среды.

Для использования в качестве источника тепла **подходят воздух, земля и вода**. При этом как источник тепла в реверсном режиме можно использовать только лишь грунт. Поэтому ввиду специфики настоящей монографии в дальнейшем нами в качестве источника тепла будут рассматриваться только лишь грунтовые основания.

1.5. Грунтовые тепловые насосы

Далее остановимся на способах получения тепла из грунтовых оснований. Тепло из грунта можно получать по-разному. Специалисты подразделяют здесь источники тепла, использующие тепловую энергию

приповерхностных слоёв грунта, и источники, использующие глубинное геотермическое тепло.

Приповерхностное тепло теплового насоса – это солнечное тепло, накапливаемое грунтом сезонно и используемое с помощью так называемых **геотермических грунтовых коллекторов**, которые укладываются горизонтально на глубине от 1,20 м до 1,50 м и более.

Геотермическое тепло стремится из глубины земных слоёв к поверхности и используется с помощью **глубинных геотермических зондов**. Зонды погружаются в основание вертикально на глубину до 150 м.

Обе системы использования тепловой энергии грунтовых оснований (т.е. **геотермические грунтовые коллекторы и глубинные геотермические зонды**) характеризуются высокой и относительно стабильной температурой окружающей среды (т.е. основания) в течение всего времени их эксплуатации. Это, в свою очередь, позволяет обеспечить высокий годовой коэффициент эффективности эксплуатации теплового насоса. Кроме того, обе названные системы работают в закрытых контурах, что обеспечивает их высокую надёжность и минимальные затраты на обслуживание. В таком закрытом контуре циркулирует смесь воды и антифриза (этиленгликоля). Эту смесь называют также «рассолом». В ряде случаев вместо антифриза используется очищенная от примесей вода.

Далее остановимся на перечисленных системах использования тепловой энергии грунтовых оснований подробнее.

1.6. Плоские грунтовые коллекторы

В данном случае отбор тепла из поверхностного слоя грунта производится с помощью пластиковых труб большой площади, уложенных параллельно поверхности земли, как правило, в виде нескольких контуров (рис. 6). При этом один контур по своей длине не должен превышать

100 м., так как иначе потребуется слишком высокая мощность качающего насоса.

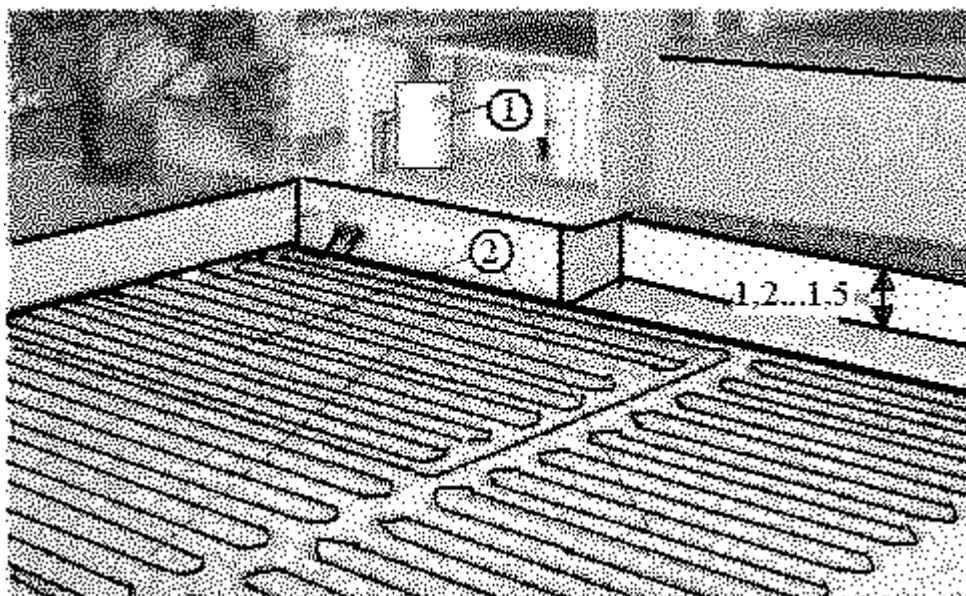


Рис. 6. Отопление здания с использованием плоского коллектора (схема)

1– тепловой насос; 2– плоский грунтовый коллектор

Отдельные контуры подключаются к распределительному устройству, которое должно находиться в самой высокой точке, чтобы обеспечить возможность удаления воздуха из системы трубопроводов.

Согласно данным фирмы «Юнкерс» временное оледенение грунта не имеет никаких негативных последствий на функционирование теплового коллектора и на растительное покрытие технологической площади. По возможности необходимо следить за тем, чтобы на площади, занимаемой грунтовым коллектором, не располагались растения с глубокой корневой системой. Важно также, чтобы трубы укладывались в песчаной постели для предотвращения их вероятных повреждений острыми камнями.

Прежде чем выполнять обратную засыпку коллектора, обязательно рекомендуется опрессовать систему трубопроводов. Лучше всего держать трубопровод под испытательным давлением также в процессе проведения обратной засыпки. Тогда очень легко сразу заметить вероятные повреждения.

Выполнение требуемых перемещений грунта возможно без больших дополнительных затрат в особенности на новостройках.

Величина отбора тепловой мощности из грунта зависит от многих факторов, прежде всего – от влажности грунта. Из опыта известно, что особенно хороший результат был получен при укладке коллектора во влажные суглинки. При этом наименее пригодными для отбора тепла являются сухие песчаные грунты (таблица 5).

Таблица 5

Удельные мощности отбора грунта из различных видов грунтовых оснований

Наименование грунта	Удельная мощность отбора тепла q , $\left[\frac{Вт}{м^2} \right]$
Сухой песок	10
Влажный песок	15,0 – 20,0
Сухой суглинок	20,0 – 25,0
Влажный суглинок	25,0 – 30,0
Суглинок, насыщенный водой	35,0 – 40,0

Грунтовые тепловые насосы, в которых теплообмен с основанием осуществляется с использованием плоских коллекторов имеет по сравнению с аналогичными отопительными системами **такие преимущества:**

- низкие эксплуатационные затраты;

- высокие годовые коэффициенты эффективности эксплуатации теплового насоса.

Таблица 6

Зависимость технологической площади поверхности основания от площади отапливаемого здания.

Жилая площадь [м ²]	Удельная отопительная нагрузка [Вт/м ²]					
	30	40	50	60	70	80
	Требуемая технологическая площадь поверхности грунта для обустройства грунтового коллектора теплового насоса [м ²]					
100	90	120	150	180	210	240
125	113	150	188	225	263	300
150	135	180	225	270	315	360
175	158	210	263	315	368	420
200	180	240	300	360	420	480

При этом рассматриваемые системы имеют такие **недостатки**:

- потребность в большой технологической площади (эта площадь всегда выше общей площади отапливаемого здания, см. таблицу 6);
- невозможность ремонта уже уложенных в основание труб.

1.7. Грунтовые зонды

Грунтовые зонды в качестве теплообменников тепловых насосов получили за последние годы очень широкое распространение. Это обусловлено простотой их устройства и незначительной технологической площадью, занимаемой этими устройствами.

Грунтовые зонды состоят, как правило, из пучка четырёх параллельных пластиковых труб, концы которых свариваются специальными фасонными деталями и образуют так называемую **ножку**

зонда. При этом каждые две пластиковые трубы соединяются таким образом, что создают два независимых один от другого контура. Другое название этих устройств – двойные U-образные зонды.

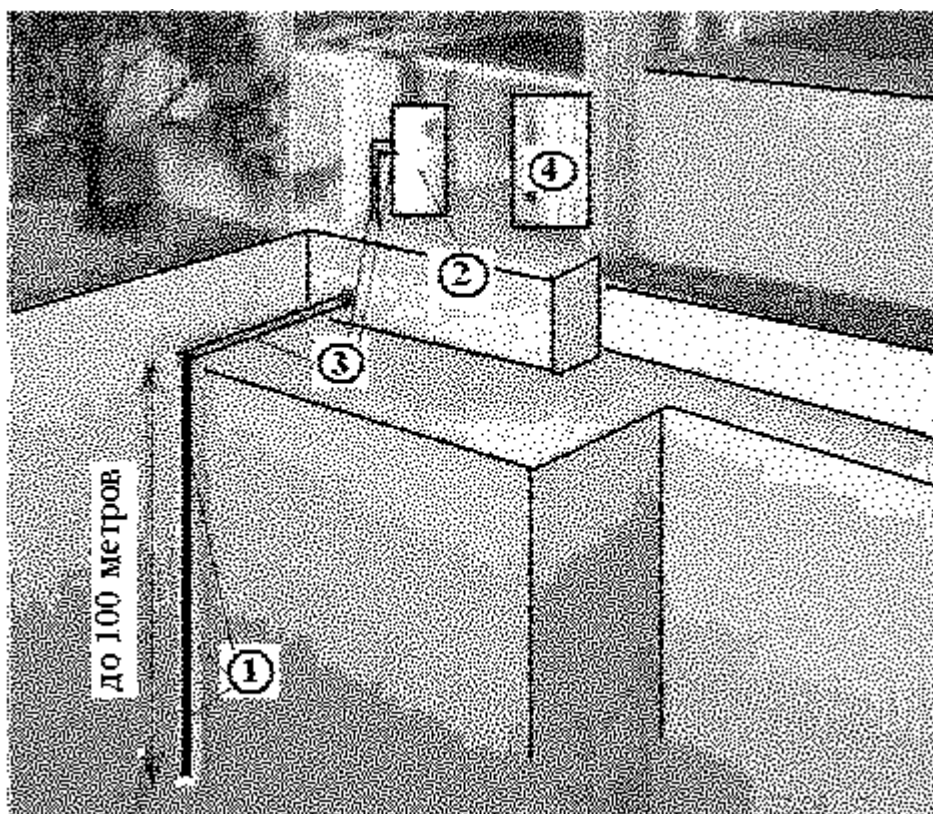


Рис. 7. Грунтовой зонд (схема)

1–U – образный грунтовой зонд;

2–тепловой насос;

3–коммуникации, соединяющие грунтовой зонд с тепловым насосом;

4–бак– накопитель теплой воды

При наличии хороших гидрогеологических условий можно обеспечить высокую эффективность отбора тепла из грунта.

Предпосылкой для планирования и обустройства грунтовых зондов служит

точная информация о характерных свойствах грунта и информация о протекающих внутри грунтовых оснований процессах. В настоящее время в Германии уже создана целая сеть фирм, которые специализируются в области обустройства грунтовых зондов и, наряду с проектированием и устройством зондов, предлагают также разрешительную документацию. Можно также обратиться за профессиональной консультацией к специалистам-геологам или в местный геологический департамент.

В качестве эмпирических данных для проектирования U -образных грунтовых зондов могут быть приняты данные, представленные в таблице 7.

Таблица 7

Зависимость глубины погружения в грунт U -образного грунтового зонда от площади отапливаемого здания

Жилая площадь [м ²]	Удельная отопительная нагрузка [Вт/м ²]					
	30	40	50	60	70	80
	Требуемая глубина погружения грунтового зонда теплового насоса [м]					
100	45	60	75	90	210	120
125	56	75	94	112	131	150
150	67	90	112	134	157	180
175	79	105	131	158	183	210
200	90	120	150	180	210	240

Грунтовые тепловые насосы, в которых теплообмен с основанием осуществляется с использованием U -образных грунтовых зондов, имеет по сравнению с аналогичными отопительными системами **такие преимущества:**

- высокую надёжность;
- низкие эксплуатационные затраты;

- незначительную потребность в занимаемой технологической площади;
- высокие годовые коэффициенты эффективности эксплуатации теплового насоса.

При этом грунтовые зонды имеют такие **недостатки**:

- высокие инвестиционные затраты (т.е. стоимость устройства);
- устройство грунтовых зондов возможно не во всех регионах Украины (например, в тех регионах, где скальные грунты залегают вблизи дневной поверхности).

1.8. Обсуждение результатов исследований. Выводы по разделу

Изложенные в настоящем разделе материалы исследований позволили нам сделать такие выводы.

1. Существует эффективная инновационная технология отопления зданий и сооружений и подогрева воды с использованием так называемых тепловых насосов. Эта технология позволяет экономить невозобновляемые источники энергии (газ, нефть, уголь и т.д.). В ее основе лежит использование для нужд отопления и подогрева воды низкопотенциального тепла окружающей среды [1, 8, 14, ..., 18, 21, 22].

2. При использовании для нужд отопления зданий и сооружений и подогрева воды тепловых насосов в настоящее время используют такие источники тепла [14, ..., 18]:

- грунтовые основания;
- водные источники (реки, озера, моря, океаны и т.д.);
- воздух.

3. Наиболее перспективным для использования в реверсном режиме (летом– для нужд охлаждения помещений, а зимой– для их отопления)

являются водо- и неводонасыщенные грунтовые основания [14].

4. Различают плоские и глубинные грунтовые коллекторы тепловых насосов. В первом типе грунтового коллектора используется тепло поверхностного слоя грунта, а во втором – тепло глубинных слоев основания.

5. В настоящее время расчет и проектирование тепловых насосов выполняют с использованием эмпирических формул, таблиц и графиков, которые для условий Украины полностью отсутствуют [1].

Кроме того, анализ представленных в настоящем разделе данных позволил нам установить следующее.

1. Для экономии территории целесообразно располагать плоские коллекторы под зданиями и сооружениями. Однако в этом случае отрицательные температуры основания могут привести к морозному пучению грунта и как следствие – к повреждениям (вплоть до разрушения) расположенных на нем фундаментов зданий и сооружений. Поэтому не понятно, каким образом выполнять расчет и проектирование таких оснований и расположенных на них фундаментов.

2. Для экономии средств целесообразно заменять один расположенный в глубокой скважине глубинный грунтовый U - образный грунтовый зонд, расположенными в скважинах меньшей глубины. Однако на этот счет в литературе нет никаких рекомендаций.

3. Целесообразно совмещать свайные фундаменты с U - образными грунтовыми зондами. При этом, однако, следует учитывать, что при замораживании и оттаивании грунта вокруг сваи существенно изменяется ее несущая способность. В этой связи не понятно, каким образом следует проектировать такие свайные фундаменты.

4. Не понятно, каким образом следует рассчитывать параметры грунтовых тепловых насосов, работающих в реверсном режиме.

В целом, был сделан вывод о том, что для получения ответов на сформулированные выше вопросы необходимо уметь определять

температурные поля в основаниях тепловых насосов и их трансформацию в пространстве и времени под влиянием различных факторов. На решение этой проблемы и направлены изложенные ниже исследования.