

ШАПОВАЛ В.Г., МОРКЛЯНИК Б.В.

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Днепропетровск 2009 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Зависимость украинской экономики от импортных энергоресурсов заставляет искать все новые пути снижения затрат на отопление зимой и кондиционирование летом.

В этой связи значительный интерес представляет инновационная технология, основанная на использовании так называемых тепловых насосов.

Данная технология привлекательна хотя бы с той точки зрения, что для выработки одного и того же количества тепла тепловой насос потребляет в 2,5...4,5 электрической энергии меньше чем любой другой электрический нагревательный прибор.

Если же тепловой насос используется в реверсном режиме (т.е. для отопления зимой и кондиционирования летом), то экономия энергии существенно возрастает по сравнению с приведенными цифрами.

Привлекательным является также тот факт, что в данный момент в Украине имеет место некоторый избыток электрической энергии.

Кроме того, использование тепловых насосов для отопления и кондиционирования преимущественно в ночное время позволит существенно разгрузить электрические сети и еще сильнее снизить затраты на отопление (в Украине «ночной» тариф электрической энергии значительно ниже «дневного»).

Суть этой технологии заключается в том, что в отопительный период на обогрев зданий и сооружений расходуется низко потенциальное природное тепло грунтовой толщи, а при кондиционировании избыток тепла не рассеивается в атмосфере, а отводится в грунтовое основание (если система работает в реверсном режиме, то имеет место накопление тепловой энергии).

Отметим также, что тепловые насосы получили значительное распространение в бедных природными ресурсами и промышленно развитых странах (Австрия, Швеция, Япония), которые кроме всего прочего обладают высокой экологической культурой.

Последнее косвенно свидетельствует о том, что при использовании тепловых насосов практически не возникает проблем экологического плана.

При написании настоящей монографии преследовалась цель, в первую очередь, обратить внимание украинской (и не только) научной (и не только) общественности на новые возможности энергосбережения и познакомить ее с опытом использования в развитых странах для этой цели тепловых насосов.

Кроме того, в книге очерчены новые задачи механики грунтов, обусловленные использованием тепловых насосов, а также представлены полученные нами оценки, подтверждающие перспективность их использования в условиях Украины.

Монография рассчитана на широкий круг читателей, в том числе специалистов в области внедрения инновационных технологий, отопления и кондиционирования, а также механики грунтов, оснований и фундаментов.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.

Структура потребления энергетических ресурсов в Украине такова, что имеет место недостаток природного газа и нефтепродуктов, (основной объем поставляется из – за рубежа) и избыток электрической энергии, часть которой идет на экспорт.

При этом структура украинской экономики (ранее – составной части обладающейго избытком энергоресурсов экономики СССР) такова, что недостаток природного газа и нефтепродуктов делает ее зависимой от стран – поставщиков этих ресурсов.

О серьезности проблемы обеспечения Украины собственными энергоресурсами и экономного их потребления свидетельствуют многочисленные законы и постановления, принятые различными органами управления [1-9].

На наш взгляд одним из путей решения указанной проблемы является изменение структуры потребления энергии, необходимой для отопления и кондиционирования зданий и сооружений (т.е. замене части природного газа и нефтепродуктов электрической энергией), при уменьшении ее расхода.

В этой связи представляет интерес использование в качестве отопительного прибора изобретенного в 1852 лордом Кельвином теплового насоса [10].

В ряде литературных источников в качестве изобретателя теплового насоса называют австрийского инженера Питера Риттера фон Риттенберга [11].

Тепловые насосы (по сути, холодильники наоборот) получили наиболее широкое распространение в качестве элементов отопительных приборов и кондиционеров в высокоразвитых (обычно бедных собственными природными энергетическими ресурсами) странах (Австрия, Великобритания, Швеция, Япония и др.) [10].

Согласно [12,13] в настоящее время в Австрии установлено около 200000 тепловых насосов. Это позволяет сэкономить около 252000 тонн топлива в год (в пересчете на нефть). Поэтому количество тепловых насосов в этой небольшой стране ежегодно возрастает приблизительно на 5000 штук.

Об эффективности этих отопительных приборов свидетельствует тот факт, что в Швеции все желающие поставить тепловой насос для отопления получают от государства специальную субсидию, а в Японии этими приборами оборудовано около 90% домохозяйств [10].

В данном случае в пользу тепловых насосов свидетельствует и тот факт, что Швеция и Австрия отличаются высокой экологической культурой.

К тепловым насосам также проявляют интерес страны СНГ, в том числе, значительно более богатые энергетическими ресурсами, чем Украина. Так, согласно [10], в Санкт – Петербурге складское помещение площадью 420 кв.м. отапливается с использованием теплового насоса и девяти U – образных 124 – метровых грунтовых зондов (о конструктивных особенностях тепловых насосов смотри ниже). Кроме того, английским архитектором и инженером Норманом Форстером (он также знаменит как автор проекта постройки нового здания Рейхстага в Берлине) разработан проект 600 – метрового здания в г. Москве, в котором предусмотрены такие инновационные энергосберегающие технологии:

- естественное (т.е. солнечное) освещение всего здания (для этой цели используется специальная система зеркал);
- система тепловых аккумуляторов (ее назначение накапливать солнечную энергию днем и расходовать ее ночью);
- использование теплого воздуха с нижних этажей для обогрева верхних);
- использование солнечных батарей для получения электроэнергии;

- использование для бытовых нужд (например, для смыва в туалетах) дождевой и талой воды;
- **использование для обогрева и кондиционирования здания тепловых насосов [14, 15].**

В целом, изложенные в настоящем разделе материалы исследований позволяют сделать вывод о том, что в условиях бедной традиционными энергетическими ресурсами (т.е. нефтью и газом) Украины использование тепловых насосов для нужд кондиционирования и отопления зданий и сооружений является если не панацеей, то значительным вкладом в решение энергетической проблемы.

2. УСТРОЙСТВО ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ. СПОСОБЫ И ВАРИАНТЫ РАЗМЕЩЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ.

Остановимся подробнее на ключевых особенностях конструкции тепловых насосов.

Согласно [15] их основой является тепловая машина (рис. 1).

Принцип действия тепловой машины основан на тепловых эффектах

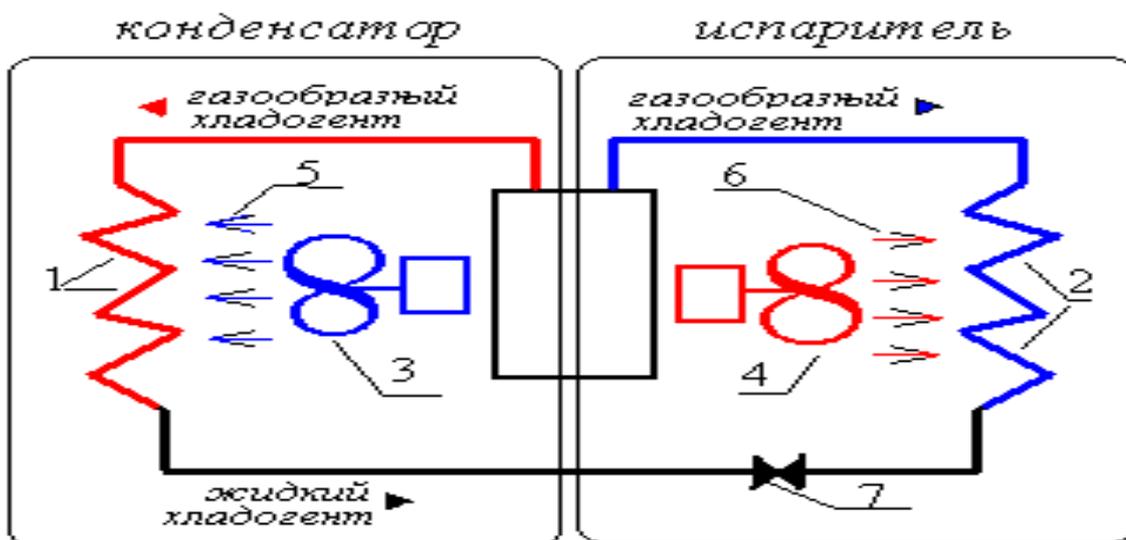


Рис. 1. Тепловая машина (схема). 1-конденсатор; 2-испаритель; 3-вентилятор, охлаждающий испаритель; 4-вентилятор, работающий на нагрев конденсатора; 5-поток нагреваемого воздуха (жидкости); 6 – поток охлаждаемого воздуха (жидкости), 7 - дроссель.

фазовых переходов [16]. Суть этих эффектов заключается в способности

жидкости поглощать тепло при ее испарении и способности газа выделять тепло при его конденсации. Поэтому тепловые машины используют либо в качестве холодильника либо в качестве отопительного прибора (нагревателя).

В случае использования тепловой машины в качестве холодильника процесс преобразования энергии организован так. Конденсатор находится снаружи охлаждаемого помещения, а испаритель – внутри. В процессе работы хладагент при испарении забирает тепло из помещения. Обычно в качестве хладагента используют фторхлоруглеводороды. Образовавшийся в процессе фазового перехода газ поступает в компрессор, который превращает его в пар высокого давления. В процессе сжатия выделяется значительное количество теплоты. Далее газ попадает в конденсатор, где он сжижается и переходит в жидкое состояние. При этом в окружающую среду (например, в атмосферу) выделяется значительное количество тепла, которое рассеивается в ней. Далее давление хладагента снижается (обычно для этой цели используют капиллярную трубку) и он возвращается в испаритель, где вновь превращается в газ (при этом из окружающей среды вновь поглощается тепло).

Таким образом, при использовании тепловой машины в качестве холодильника имеют место четыре фазы цикла:

- сжатие;
- сжижение;
- расширение;
- испарение.

Если тепловая машина используется в качестве нагревательного прибора, процесс преобразования энергии организован так. Конденсатор находится внутри охлаждаемого помещения, а испаритель – снаружи.

Хладагент в процессе его сжатия с использованием компрессора и фазового перехода (т.е. конденсации) отдает тепло в помещение. Образовавшаяся в процессе фазового перехода жидкость поступает в испаритель, который находится вне обогреваемого помещения. Здесь она превращается в газ. При этом происходит интенсивное поглощение теплоты из окружающей среды. Далее газ попадает в конденсатор и процесс повторяется.

Следовательно, при использовании тепловой машины в качестве отопительного прибора имеют место такие четыре фазы цикла:

- расширение;
- испарение;
- сжатие;
- сжижение.

Таким образом, одна и та же тепловая машина может быть использована как для обогрева, так и для кондиционирования помещений.

Если тепловая машина используется для отопления помещения (в общем случае здания или сооружения) в качестве элемента теплового насоса, охлажденный хладагент частично нагревается за счет низкопотенциального тепла основания, среднесуточная температура которого выше температуры наружного воздуха (т.е. воздуха за пределами помещения, рис. 2). При этом теплообмен между хладагентом и основанием осуществляется посредством промежуточного элемента – грунтового коллектора.

Если тепловая машина используется для кондиционирования помещения (в общем случае здания или сооружения), некоторая часть избыточного тепла от кондиционера отводится в основание, среднесуточная температура которого ниже температуры наружного воздуха (т.е. воздуха за пределами помещения, рис. 3).

Однако тепловая машина является лишь частью теплового насоса, принцип действия которого заключается в том, что для обогрева некоторого объема здания из гораздо большего объема основания забирается низко потенциальное тепло (рис. 4).

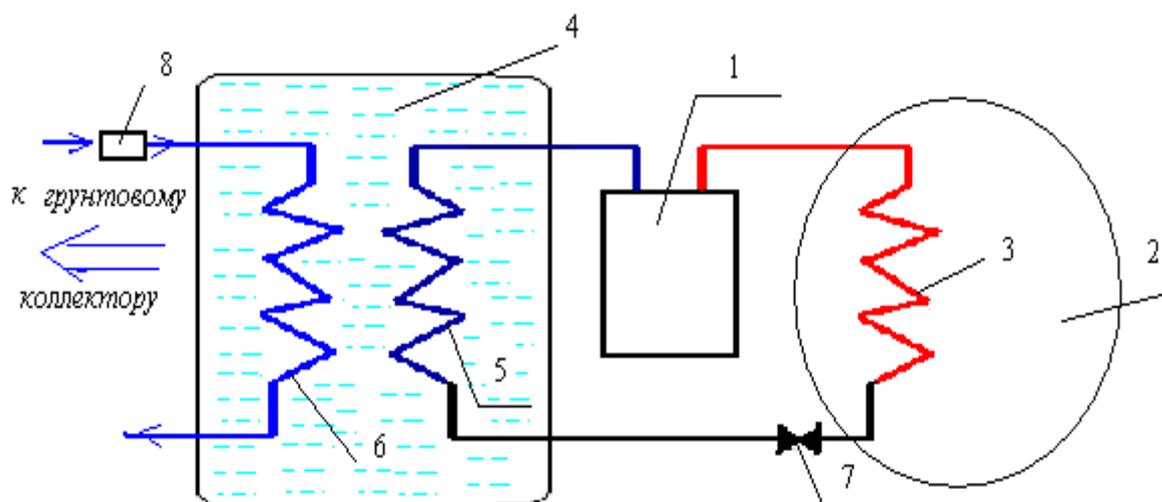


Рис. 2. Использование теплового насоса в качестве отопительного прибора (схема). 1-компрессор; 2-обогреваемое помещение; 3 - конденсатор; 4-теплообменник; 5- испаритель; 6 – теплообменник грунтового коллектора; 7 – дроссель; 8 – вспомогательный циркуляционный насос (служит для обеспечения циркуляции теплоносителя в грунтовом коллекторе).

Примечания. 1. Красным цветом обозначен разогретый, а темно - синим – охлажденный хладагент. 2. Светло – синим цветом показан теплообменник теплового насоса.

Если тепловой насос используется для кондиционирования некоторого

объема здания, то в гораздо больший объем основания отводится избыток тепла (рис. 5).

Таким образом, для того, чтобы обогреть некоторый объем здания с использованием теплового насоса, мы должны охладить гораздо больший объем грунта.

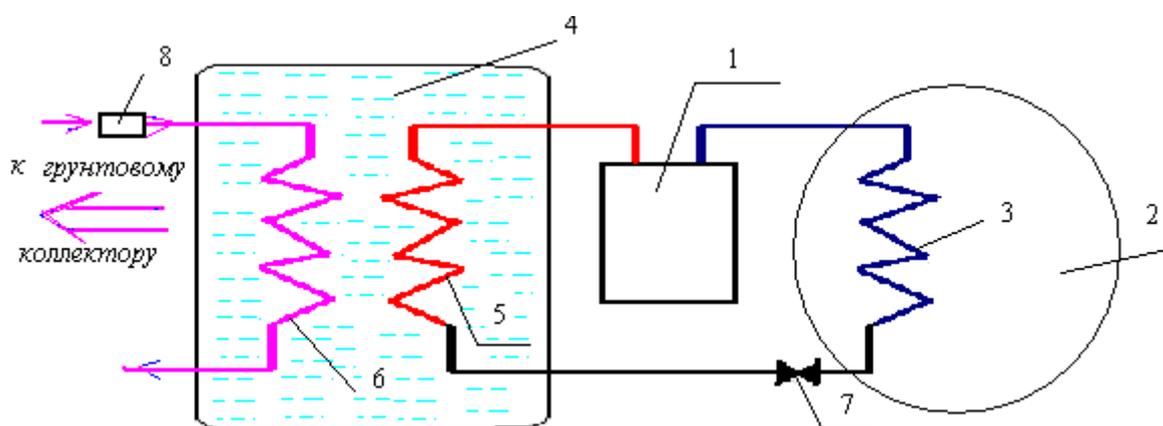


Рис. 3. Использование теплового насоса в качестве кондиционера (схема). 1-компрессор; 2-кондиционируемое помещение; 3 – испаритель; 4-теплообменник; 5 - конденсатор; 6 – теплообменник грунтового коллектора; 7 – дроссель; 8 – вспомогательный циркуляционный насос (служит для обеспечения циркуляции теплоносителя в грунтовом коллекторе).

Примечания. 1. Красным цветом обозначен разогретый, а темно - синим – охлажденный хладагент. 2. Розовым цветом показан теплообменник теплового насоса.

При этом для того, чтобы охладить некоторый объем здания, мы должны повысить температуру гораздо большего объема грунта.

В этом также заключается основная проблема использования тепловых насосов в качестве отопительного прибора и (или) устройства для кондиционирования воздуха, а именно - необходимость выполнения больших объемов земляных работ для прокладки грунтовых коллекторов и как следствие – относительная дороговизна указанной отопительной системы.

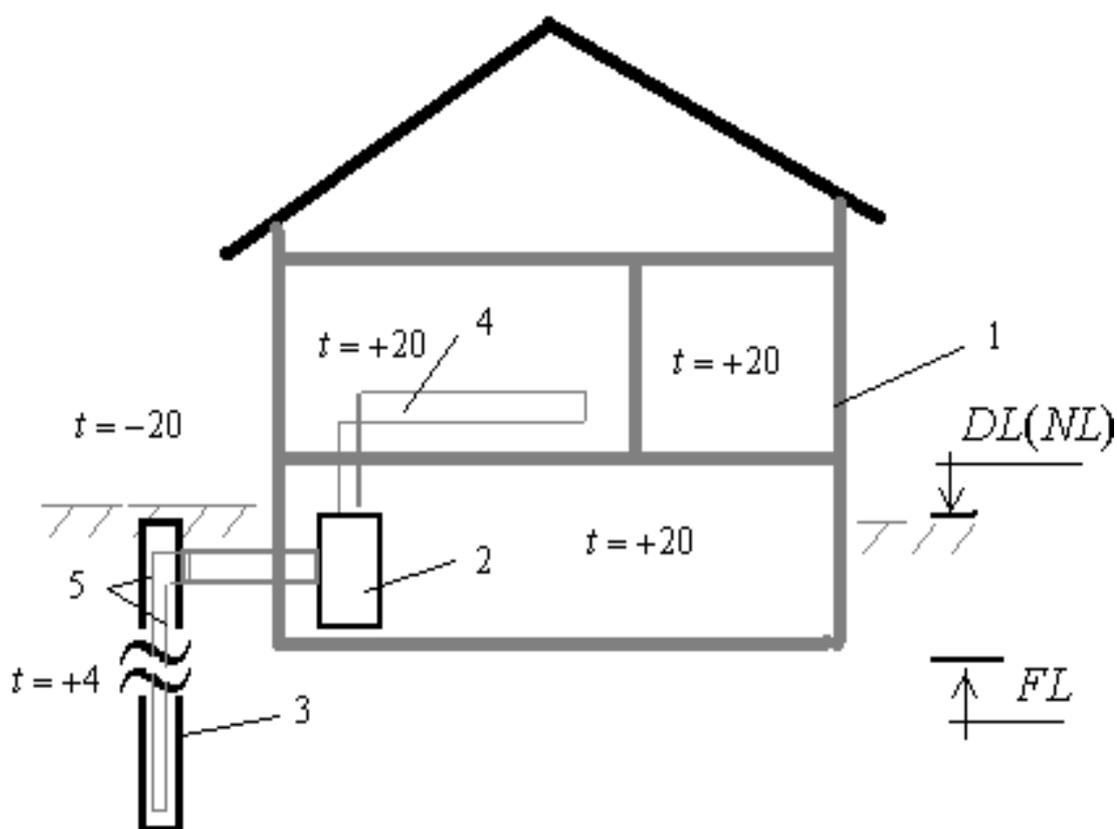


Рис. 4. Использование тепловой машины в качестве отопительного прибора (теплого насоса, схема). 1-обогреваемое здание; 2 - тепловая машина; 3- U – образный зонд (испаритель); 4-обогревательный прибор; (конденсатор); 5-трубки теплообменника.

Иными словами, отопление (или кондиционирование) с использованием теплового насоса требует значительных первоначальных капитальных вложений. Эти капитальные вложения обусловлены необходимым для прокладки грунтового коллектора значительным объемом земляных работ.

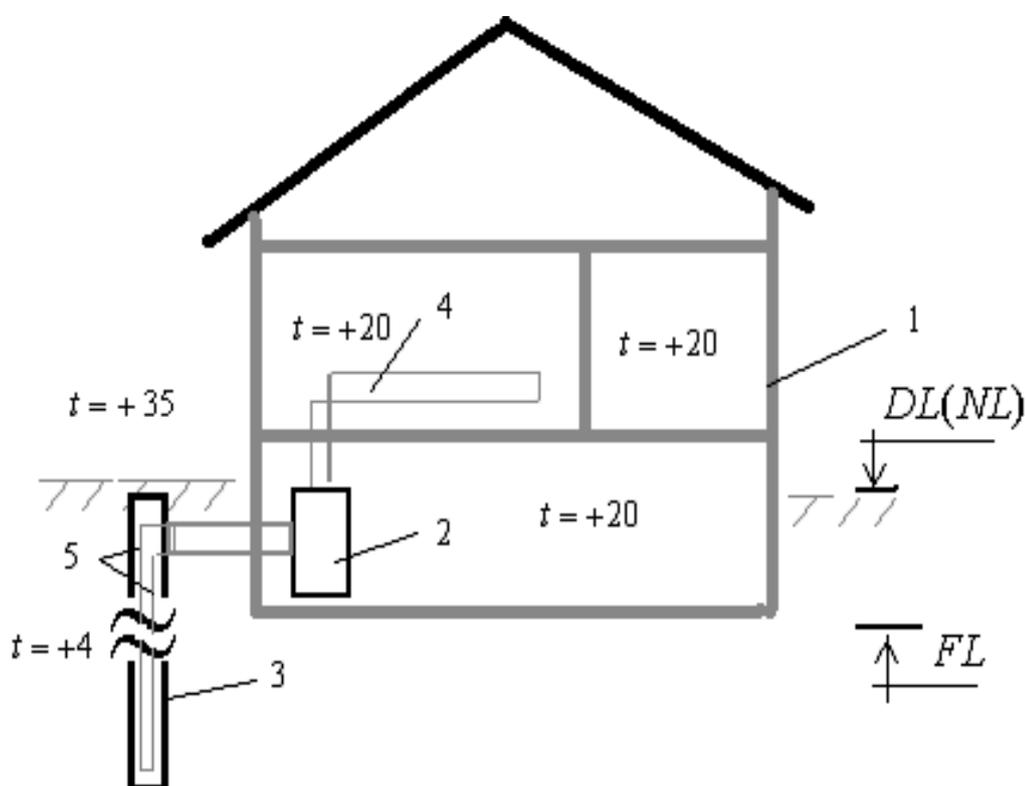


Рис. 5. Использование тепловой машины для кондиционирования воздуха (схема). 1-охлаждаемое здание; 2- тепловая машина; 3-U – образный зонд (конденсатор); 4-обогревательный прибор (испаритель); 5-трубки теплообменника.

В частности, если теплообмен с основанием осуществляется с

использованием U – образного коллектора - зонда, то глубина скважины, в которую он помещается, составляет около 120 метров [10]. В ценах августа 2008 года стоимость устройства одной такой скважины в г. Днепропетровске в зависимости от района равна приблизительно 40.000-70.000 гривен. В г. Львове стоимость аналогичной скважины будет несколько выше.

Поэтому при устройстве тепловых насосов и особенно их грунтовых коллекторов следует учитывать конкретные природные условия. Последнее

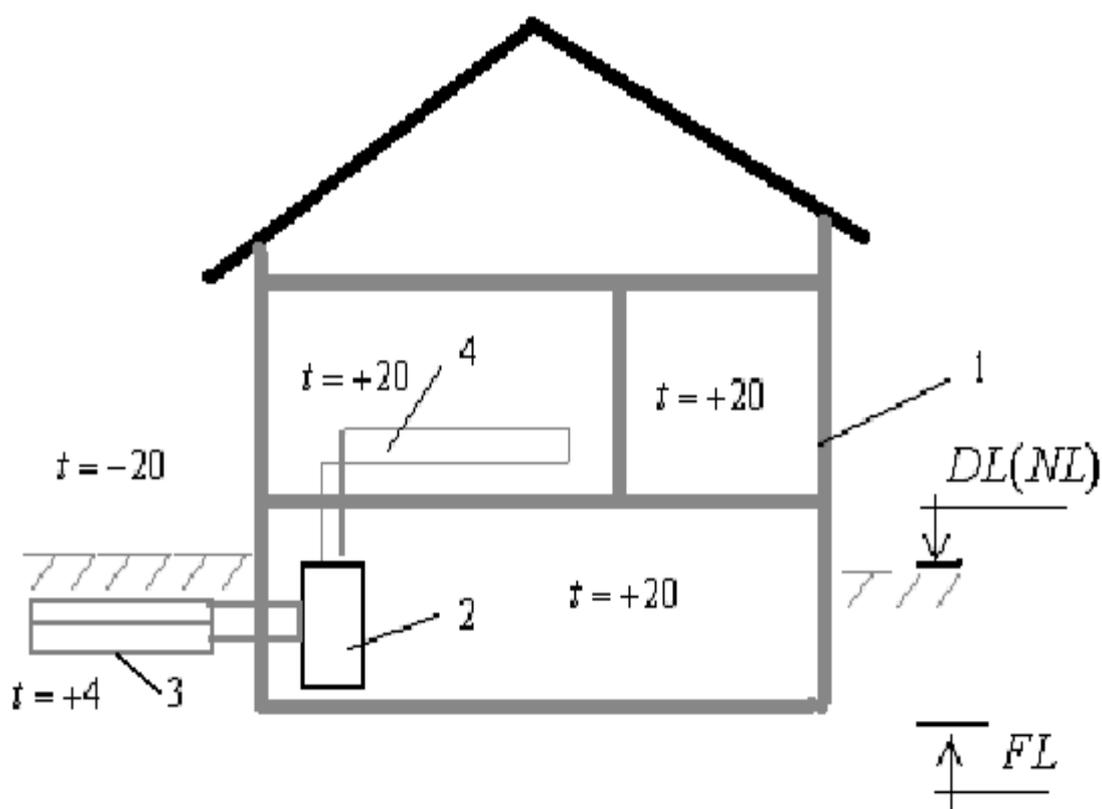


Рис. 6. Использование горизонтального коллектора для обогрева (схема). 1-обогреваемое здание; 2 – тепловая машина; 3 – горизонтальный коллектор; 4-обогревательный прибор (испаритель).

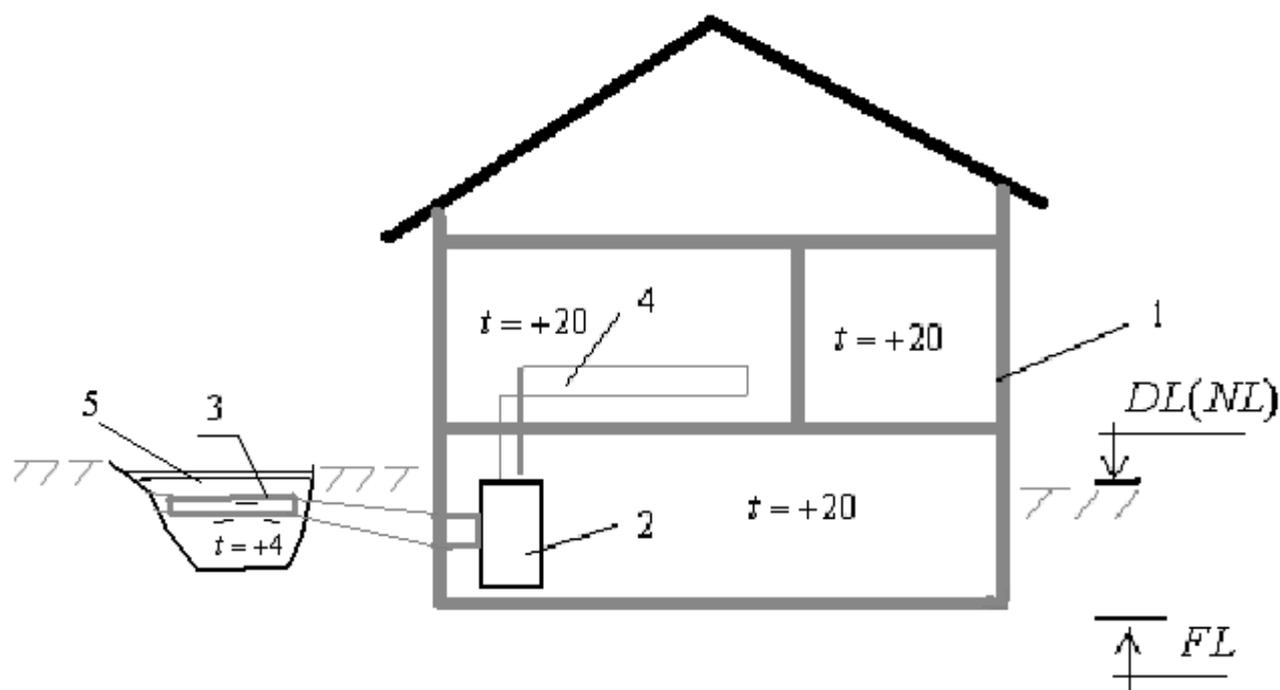


Рис. 7. Вариант размещения горизонтального коллектора теплового насоса в водоеме (схема). 1-обогреваемое здание; 2 - тепловая машина; 3 – горизонтальный коллектор; 4-обогревательный прибор (испаритель); 5 – водоем.

также определяет конструкцию и расположение теплового коллектора (т.е. наружного теплообменника). Различают такие типы коллекторов и варианты их размещения:

- U – образные грунтовые коллекторы – зонды (рис. 4 и 5);
- горизонтальные коллекторы, расположенные параллельно дневной поверхности грунта (рис. 6);
- коллекторы, помещенные в фундаменты здания (рис. 9).

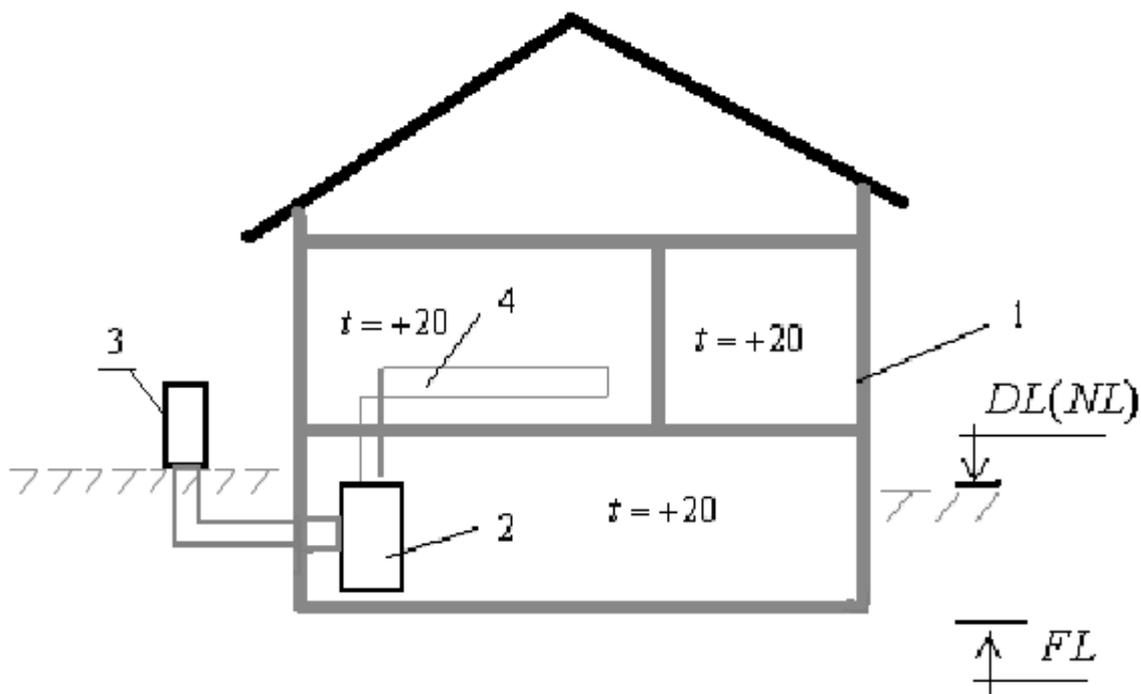


Рис. 8. Подогрев коллектора теплового насоса наружным воздухом (схема). 1-обогреваемое здание; 2 - тепловая машина ; 3 – воздухозаборник; 4-обогревательный прибор (испаритель).

- воздушные коллекторы – воздухозаборники (рис. 7);
- коллекторы, погруженные в водоем (рис. 8);
- коллекторы, помещенные в обделку подземных сооружений (рис. 10).

По виду среды, в которой расположен тепловой коллектор, различают такие системы тепловых насосов:

- «грунт – вода», (точнее «грунт – рассол») [10, 11, 12];
- «вода – вода», (иногда «вода – рассол») [10];
- «воздух – вода», (иногда «воздух – рассол») [10];
- фундамент (или фундаменты) – вода (или рассол) [10, 11, 12, 17];

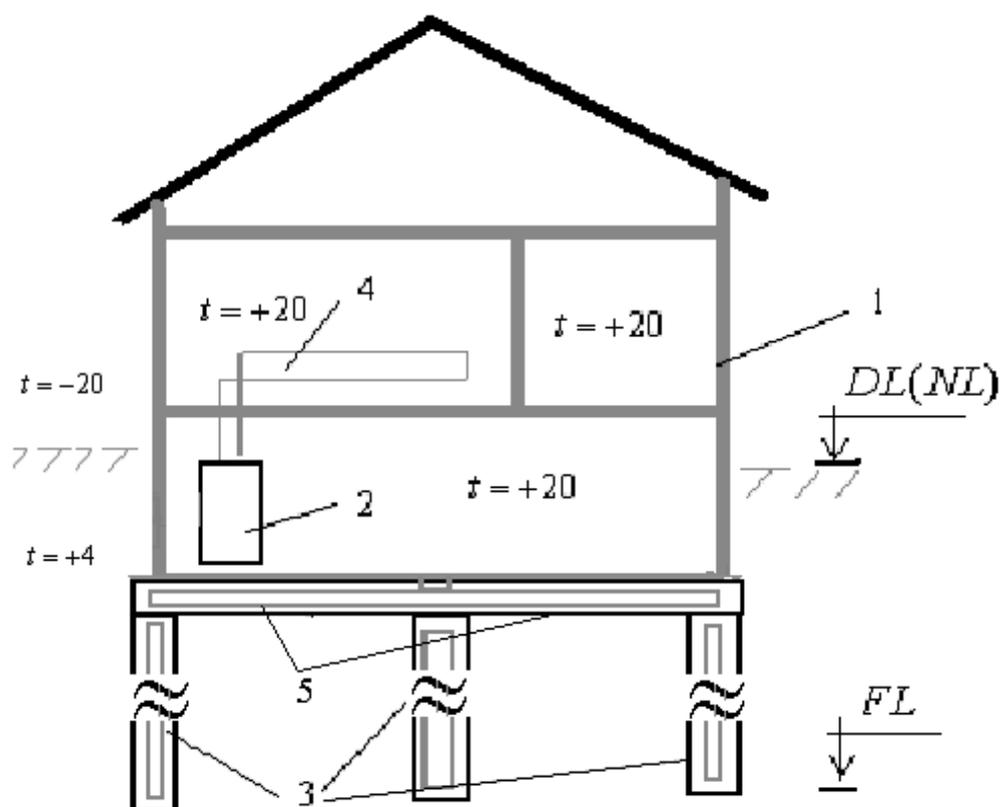


Рис. 9. Вариант размещения коллектора в фундаментах здания (схема).
 1-обогреваемое здание; 2 - тепловая машина; 3 – коллектор в свайном фундаменте; 4-обогревательный прибор (испаритель); 5 – горизонтальный коллектор в плитном (ленточном) фундаменте.

Примечание. Рисунки 1 и 2 заимствованы из [1], а рисунки 3, 4, 5 и 6 – из [2].

- комбинированные системы, в которых теплообменники (т.е. коллекторы) расположены одновременно в нескольких средах (например, в воздушной среде и грунте).

В системе «грунт – вода (или рассол)» тепловой коллектор или U –

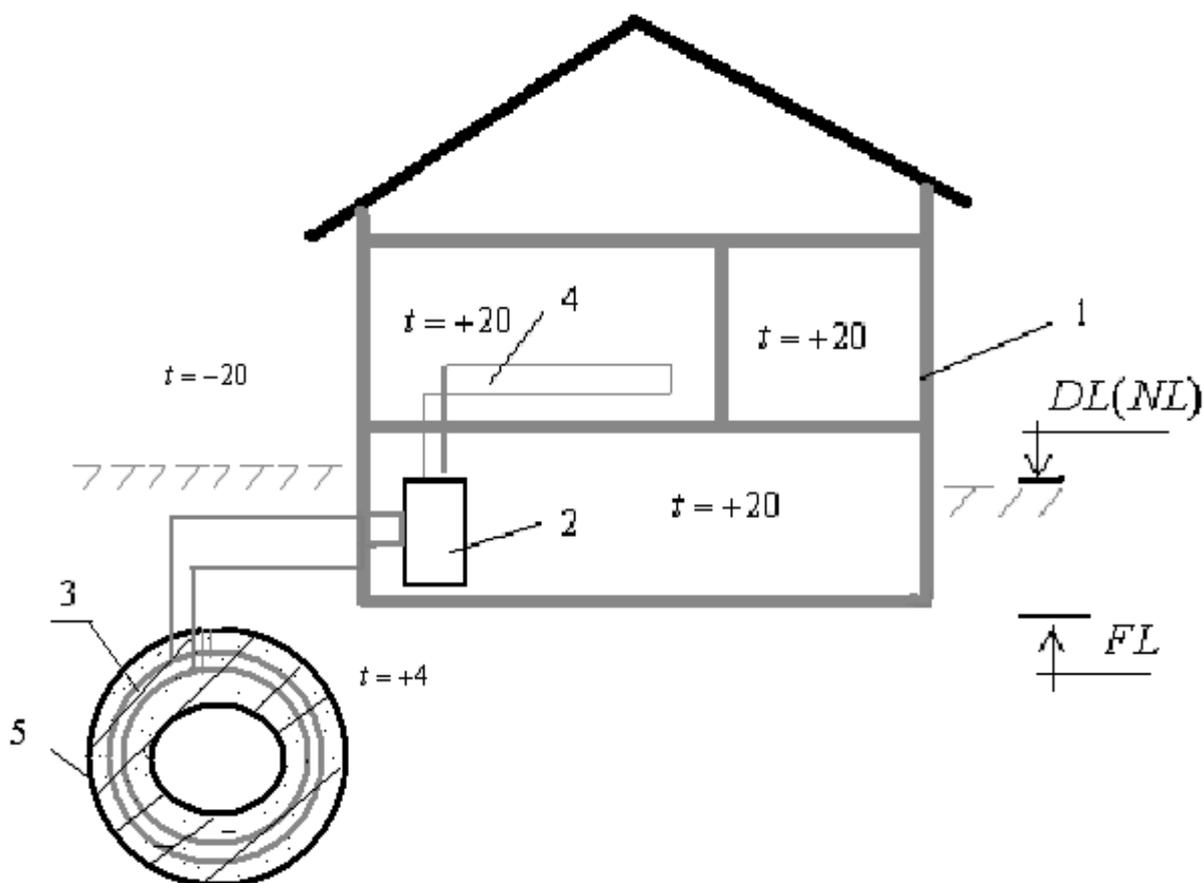


Рис. 10. Вариант размещения коллектора в обделке тоннеля (схема). 1- обогреваемое здание; 2 - тепловая машина; 3 – коллектор; 4- обогревательный прибор (испаритель); 5 – обделка тоннеля.

образный зонд из полиэтиленовых труб расположен в грунтовом основании. Иногда для этой цели используют трубы из поливинилхлорида.

В трубах циркулирует рассол (например, смесь воды и этиленгликоля) или значительно реже – вода. Необходимость использования рассола обусловлена тем, что в реальных производственных условиях целесообразно, чтобы точка замерзания теплоносителя была бы ниже нуля по Цельсию, т.е.

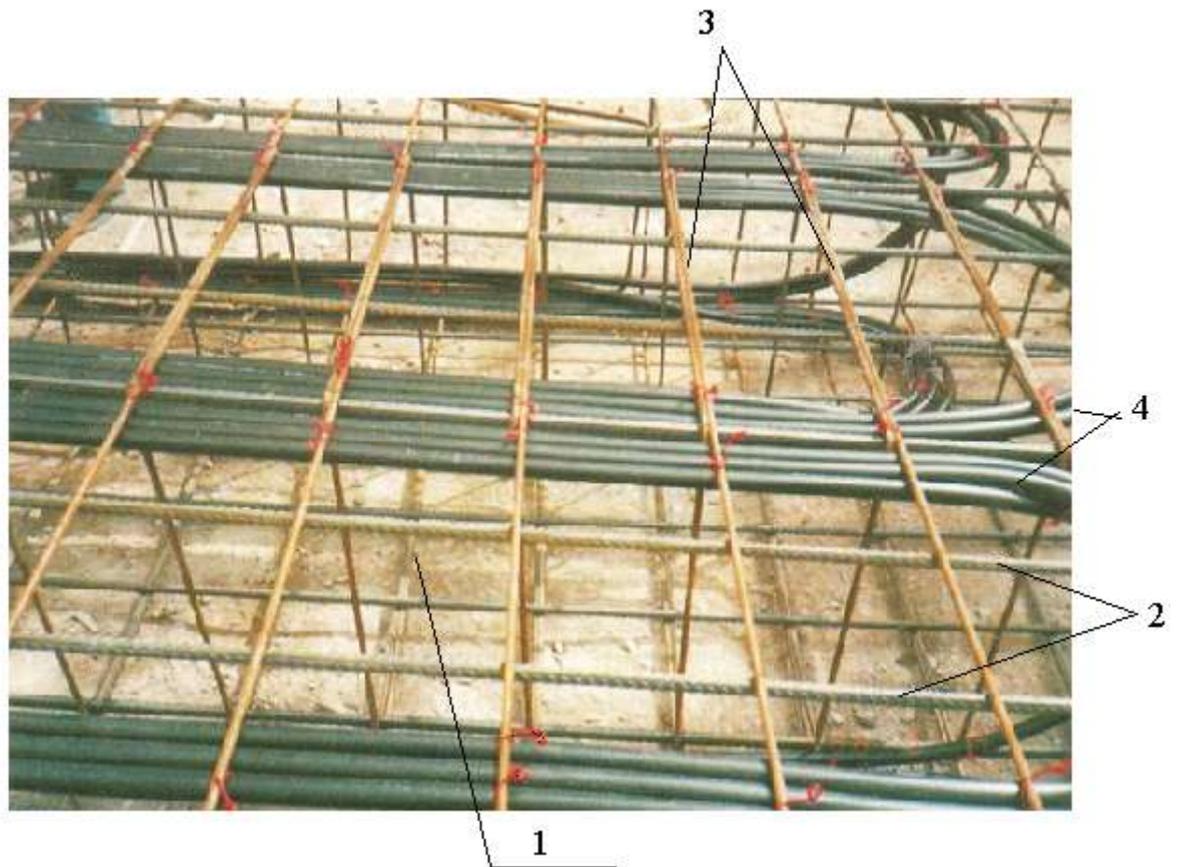


Рис. 11. Вариант прокладки коллектора теплового насоса в теле плитного фундамента. 1 – пространственный арматурный каркас; 2 и 3 – продольная и поперечная арматура; 4 – пластиковые трубы коллектора теплового насоса.

ниже температуры замерзания воды.

В коллекторе вода (или рассол) подогревается на несколько градусов за счет тепла Земли и подается в тепловую машину [10], где она (или он) системе «вода – грунт» имеет преимущество с той точки зрения, что в

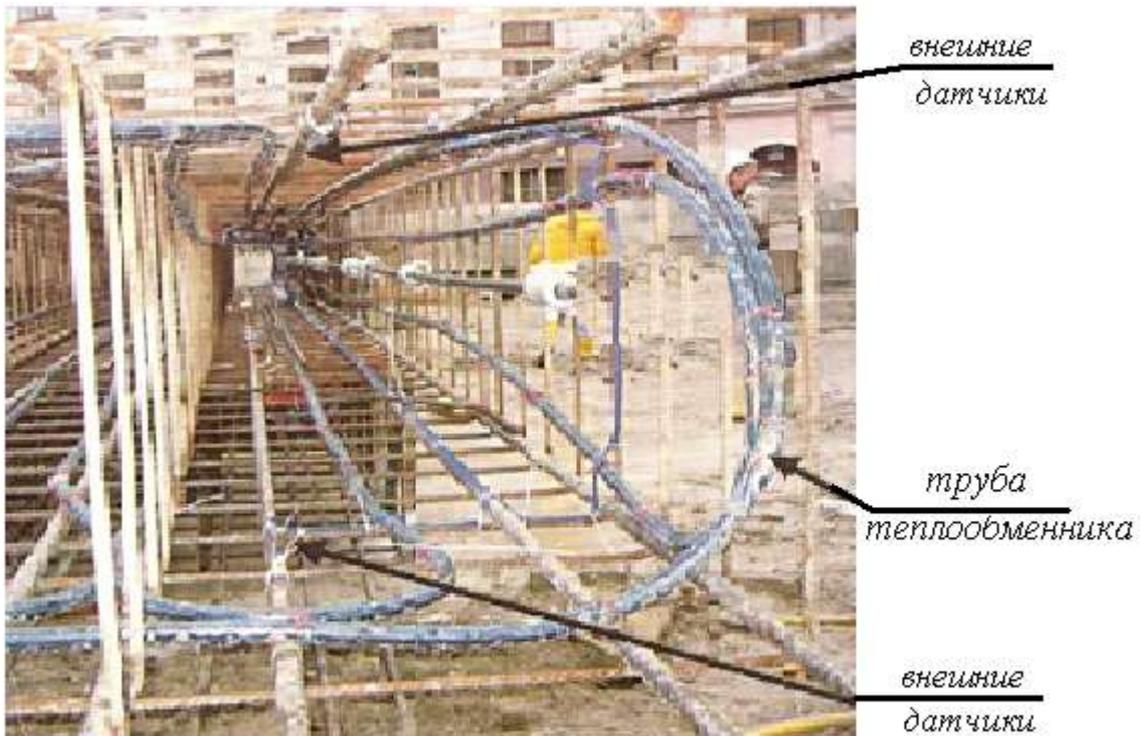


Рис. 12. Оборудование для мониторинга температурного поля внутри арматурного каркаса конструкции, возведенной методом «стена в грунте». Синим цветом показана пластиковая труба теплообменника.

данном случае начиная с глубин 20 метров и более используется тепло, приходящее из глубины Земли. При этом стоимость устройства таких теплообменников весьма высока, поскольку бурение скважин до указанной глубины требует использования обсадных труб.

Кроме того, на значительной части Украины на глубинах 20...40 метров залегают скальные породы, в которых для устройства глубоких скважин – зондов следует использовать алмазные коронки буров. Последнее также приводит к удорожанию тепловых насосов.

Использование плоских коллекторов (рис. 6) в системе «вода – грунт»

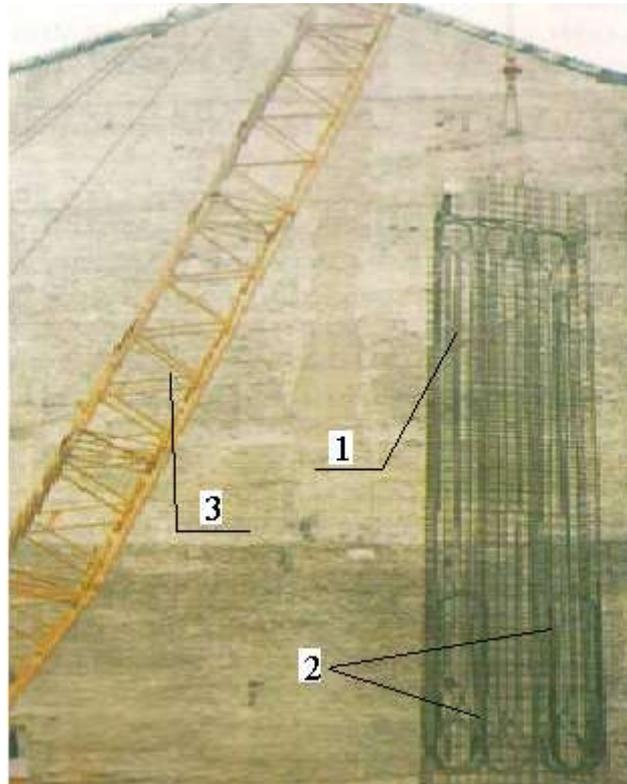


Рис. 13. Использование блочного метода монтажа элементов теплового насоса. 1 – пространственный каркас фундамента; 2 – пластиковые трубки коллектора; 3 – стрела подъемного крана.

имеет преимущество с той точки зрения, что в данном случае при устройстве значительно теплообменников сокращается объем земляных работ. При этом обогрев рассола осуществляется, в основном, за счет энергии Солнца (точнее, тепла поверхностного слоя Земли).

Совершенно очевидно, что использование U – образных коллекторов – зондов более перспективно в северных, а плоских коллекторов – в южных областях Украины.

В системе «вода – вода (или рассол)» (рис. 7) вода (или рассол)



Рис. 14. Проверка герметичности стыков теплообменника теплового коллектора высоким давлением непосредственно перед бетонированием.

подогревается на несколько градусов за счет тепла расположенных вблизи водоемов и подается в тепловую машину[10], где она (или он) нагревается до требуемой температуры и используется для обогрева здания.

В ряде случаев в тепловую машину вода из водоема подается непосредственно. В этом случае к ее чистоте (т.е. чистоте воды из водоема) предъявляются повышенные требования. Достоинством этого типа теплового насоса является отсутствие дорогостоящих земляных работ.



Рис. 15. Монтаж коллектора теплового насоса на опытном участке в туннеле Ляйнцер (Австрия).

В системе «воздух – вода (или рассол)» вода (или рассол) подогревается на несколько градусов за счет тепла окружающей здание атмосферы (рис. 8). В условиях Украины эта система реализована в бытовых кондиционерах двойного назначения (они используются как для

кондиционирования, так и для обогрева зданий). Ее недостатком является ограниченный диапазон температур функционирования (по паспорту до -10°C , а практически до $-5...-3^{\circ}\text{C}$), а также необходимость расходования дополнительной энергии на подогрев и размораживание испарителя (см. рис. 1).

Если тепловая машина используется для отопления, то в системе «фундамент – вода (или рассол)» (рис. 9) вода (или рассол) подогревается на несколько градусов за счет тепла фундаментов (обычно ленточных, плитных и свайных) [11, 12, 17] и далее поступает в тепловую машину [10].

Если тепловая машина используется для кондиционирования, то происходит охлаждение воды (рассола) за счет нагрева фундаментов и прилегающего к ним основания.

В Австрии имеется значительный опыт совмещения теплообменников и фундаментов зданий и сооружений [11, 12, 13, 17]. При этом состояние научных исследований в этом направлении таково, что уже разработаны посвященные данной проблеме технические условия.

Согласно полученным австрийскими учеными данным достоинствами этого подхода (т.е. в случае прокладки теплообменников в теле фундаментов) является совмещение работ по устройству и монтажу коллектора с работами по устройству фундаментов.

Кроме того, в данном случае автоматически обеспечивается возможность функционирования в реверсном режиме (т.е. для отопления зданий зимой и их кондиционирования летом).

На рисунке 11 показан теплообменник из пластиковых труб, помещенный в пространственный арматурный каркас плитного фундамента непосредственно перед бетонированием, а на рисунке 12 – теплообменник, помещенный в фундамент, возведенный методом «стена в грунте».

Зарубежный опыт устройства коллекторов тепловых насосов также

свидетельствует о том, что их монтаж целесообразно вести блочно – модульным способом (рис. 13). При этом следует стремиться к тому, чтобы количество соединений элементов тепловых коллекторов непосредственно на строительной площадке было бы сведено к минимуму.

Кроме того, зарубежный опыт использования тепловых насосов свидетельствует о том что, как правило, они (точнее их коллекторы) относятся либо к не подлежащим ремонту, либо трудно ремонтируемым конструкциям. Это обусловлено либо невозможностью, либо большими трудностями доступа к установленным либо под землей, либо в теле подземных железобетонных конструкций трубкам теплообменников. В этой связи, например, в Австрии разработаны специальные правовые отношения между фирмами которые изготавливают и (или) монтируют элементы тепловых насосов (например, правила страхования рисков). Кроме того, во всех странах – значительных потребителях тепловых насосов к ним предъявляются повышенные технические требования, одно из проявлений которых заключается в строгом контроле качества соединения элементов тепловых коллекторов (рис. 14).

Аналогичным образом изготавливаются и функционируют элементы тепловых насосов, в которых теплообменники размещены в подземных сооружениях и (или) их элементах (рис. 10, 15).

Изложенные в настоящем разделе материалы позволили нам сделать такие выводы.

1. Тепловой насос состоит из двух основных элементов – тепловой машины и коллектора – теплообменника.
2. В общем случае их можно использовать как для нужд отопления, так и для нужд кондиционирования, а также в реверсном режиме.

3. Тепловые эффекты в тепловых насосах обусловлены фазовыми переходами в циркулирующем в них хладагенте.
4. Экономичность работы тепловых насосов достигается за счет потребления низкопотенциального тепла Земли.
5. Размещение коллекторов – теплообменников тепловых насосов как правило осуществляют в таких средах:
 - основаниях, фундаментах и подземных удерживающих конструкциях;
 - водоемах;
 - воздушной среде.
6. Устройство коллекторов в грунтовых основаниях обычно сопряжено с большими объемами земляных работ. Это ведет к значительному удорожанию их стоимости.
7. С точки зрения экологии тепловые насосы по сравнению с другими отопительными приборами имеют преимущество, поскольку их использование не сопровождается вредными выбросами. При этом не совсем понятно, каким образом на окружающую среду оказывает принудительное изменение температуры основания в прилегающем к грунтовому коллектору основании.
8. Устройство тепловых насосов сопряжено со значительными объемами скрытых работ. Поэтому при их установке должна поддерживаться высокая дисциплина и культура производства.

В целом, изложенные в настоящем разделе материалы исследований позволили нам сделать вывод о том, что в развитых странах эксплуатация тепловых насосов постепенно становится рутинной (т.е. обычной) процедурой. Это свидетельствует об экономической целесообразности их применения для отопления и кондиционирования зданий и сооружений.

3. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ НУЖД ОТОПЛЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ПРОМЫШЛЕННО РАЗВИТЫХ СТРАНАХ

В ряде посвященных использованию тепловых насосов источников утверждается, что их коэффициент полезного действия значительно больше единицы. С точки зрения современной физической науки и термодинамики это нонсенс [18]. Поэтому при написании настоящего раздела преследовалась цель познакомить читателя с разницей между коэффициентами полезного действия (в дальнейшем КПД) и преобразования энергии (в дальнейшем КПЭ).

Остановимся на оценке эффективности работы теплового насоса согласно принятым в развитых странах Запада правилам [10]. Для этой цели там используется так называемый **коэффициент преобразования энергии** КПЭ (в ряде литературных источников его не правильно называют коэффициентом полезного действия КПД).

На самом деле коэффициент преобразования энергии и коэффициент полезного действия – абсолютно разные характеристики, поскольку **коэффициент преобразования энергии** – это отношение отдаваемой тепловым насосом тепловой мощности (или энергии) к потребляемой им электрической мощности (или энергии), т.е.

$$КПЭ = \frac{N_T}{N_Э} = \frac{W_T}{W_Э}, \quad (1)$$

где $КПЭ$ - коэффициент преобразования энергии; N_T - тепловая мощность, расходуемая на отопление здания (сооружения); $N_Э$ - электрическая мощность, расходуемая на функционирование теплового насоса; W_T -

количество тепловой энергии, расходуемой на отопление здания (сооружения) за некоторый период времени; $W_{\text{э}}$ - количество электрической энергии, расходуемой на функционирование теплового насоса за некоторый период времени.

Напомним, что **коэффициент полезного действия** равен [18]:

$$KПД = \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{общ}}} = \frac{W_{\text{п}}}{W_{\text{общ}}}, \quad (2)$$

где $KПД$ - коэффициент полезного действия; $N_{\text{п}}$ - мощность, затраченная на выполнение полезной работы; $N_{\text{общ}}$ - общая мощность; $W_{\text{п}}$ - энергия, затраченная на выполнение полезной работы за некоторый период времени; $W_{\text{э}}$ - общая энергия, израсходованная за некоторый период времени на выполнение всей работы.

Таким образом, коэффициент преобразования энергии (т.е. $KПЭ$) и коэффициент полезного действия (т.е. $KПД$) имеют абсолютно разный физический смысл.

Кроме того, поскольку, согласно [7], всегда справедливы неравенства

$$N_{\text{общ}} > N_{\text{п}} \quad \text{и} \quad W_{\text{общ}} > W_{\text{п}}, \quad (3)$$

то всегда имеет место неравенство

$$KПД < 1. \quad (4)$$

Иными словами, коэффициент полезного действия всегда меньше единицы [7].

При этом коэффициент преобразования энергии (т.е. *КПЭ*) может быть значительно больше единицы. Это объясняется тем, что часть тепловой энергии из внешнего контура теплового насоса доставляется практически «бесплатно». На это расходуется лишь незначительная мощность циркуляционного насоса.

Естественно, что использование термина «бесплатно» не совсем корректно, поскольку на нагрев воды в водоеме или грунта вокруг грунтового коллектора расходуется тепловая энергия Солнца и внутреннее тепло Земли (его природа – происходящие в ядре Земли процессы).

При этом для пользователя этих видов тепла оно в настоящее время является бесплатным.

Проиллюстрируем сказанное на конкретном примере. Пусть температура окружающего здание воздуха равна -20^0C . Далее допустим что, температура грунта равна $+10^0C$. Предположим также, что температура воды рассола в отопительной системе равна $+35^0C$.

Если бы тепловой насос не был задействован, то рассол (т.е. теплоноситель) необходимо было нагревать на температуру

$$\Delta T_1 = T_{o.m.} - T_{н.в.} = +35^0C - (-20^0C) = 55^0C. \quad (6)$$

Если задействован тепловой насос, то рассол (т.е. теплоноситель) следует нагревать на температуру

$$\Delta T_2 = T_{o.m.} - T_{г.о.} = +35^0C - (+10^0C) = 25^0C. \quad (7)$$

Здесь $T_{o.m.}$ - температура отопительного прибора; $T_{н.в.}$ - температура

наружного воздуха; $T_{2.o.}$ - температура грунтового основания.

Таким образом, в данном конкретном случае диапазон температур нагрева теплоносителя при использовании теплого насоса может быть

уменьшен в $n = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{55}{25} = 2,2$ раза.

Далее рассмотрим, каким образом в развитых странах вычисляется отопительный коэффициент. Вычисление производится для так называемых рабочих точек. Для обозначения отопительного коэффициента обычно используется аббревиатура вида

$$BT_B WT_W, \quad (8)$$

где T_B - температура рассола в коллекторе, а T_W - температура воды в отопительном контуре. Здесь «B» – первая буква английского слова «brine» (на русском языке «рассол»), а «W» – первая буква английского слова «water» (на русском языке «вода»). Например, запись

$$B4W55 = 2,5...3,2 \quad (9)$$

означает, что коэффициент температурного преобразования для рабочей точки при температуре рассола 4 градуса по Цельсию и температуре воды в батареях, равной 55 градусов по Цельсию, составляет 2,5...3,2 (или 250%...320%).

Далее выясним, насколько перспективно использование тепловых насосов для отопления и кондиционирования зданий и сооружений в условиях Украины.

Для этой цели вначале проанализируем температурный

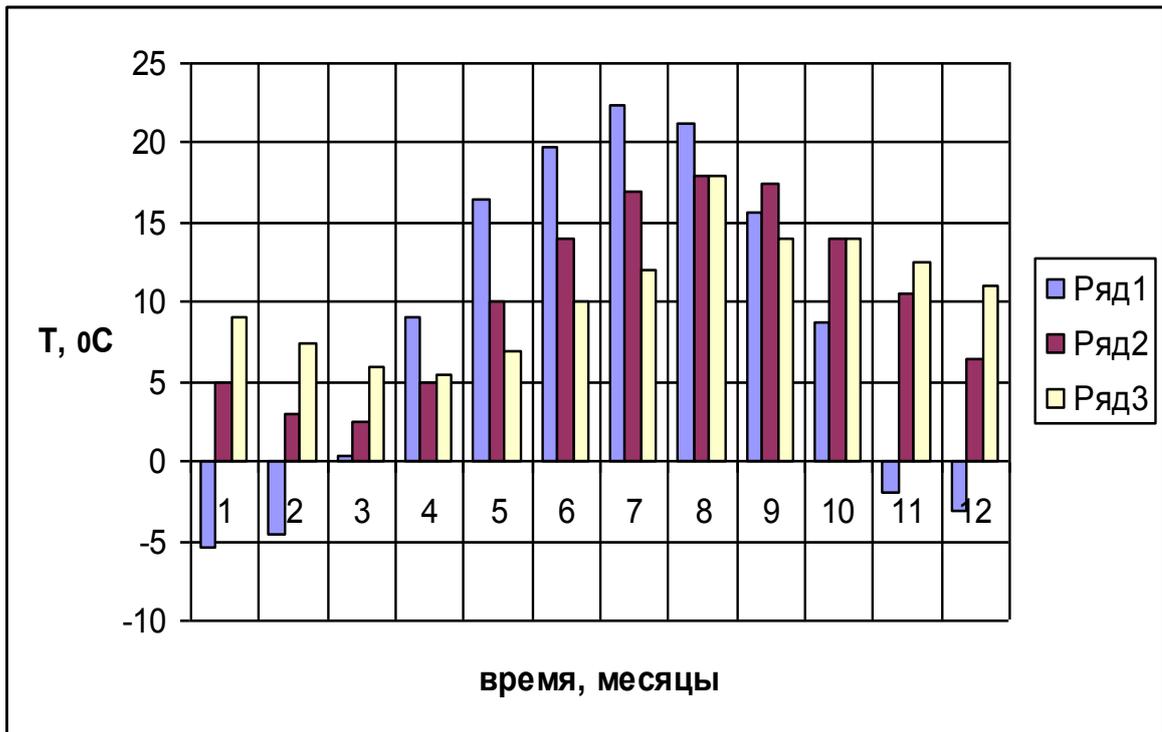


Рис. 16. Среднемесячные температуры грунтового основания в г. Днепропетровске за 2007 – 2008 годы.

Ряд 1 – на дневной поверхности; ряд 2 – на глубине 1,6 метра; ряд 3 – на глубине 3,2 метра.

режим на дневной поверхности и в глубине грунтовой толщи.

Рассмотрим два региона на территории Украины – Днепропетровскую (восток) и Львовскую (запад) области.

В качестве исходных примем результаты измерения температур на глубинах 0,0 (дневная поверхность); 1,6 и 3,2 метра от дневной поверхности (рис. 16 и 17).

Среднегодовые температуры грунтового основания в районе г. Днепропетровска равны соответственно:

- на дневной поверхности $T_{\text{ср}} = 8,5^{\circ}\text{C}$;
- на глубине $h = 1,6\text{м}$ $T_{\text{ср}} = 10,25^{\circ}\text{C}$;
- на глубине $h = 3,2\text{м}$ $T_{\text{ср}} = 10,5^{\circ}\text{C}$.

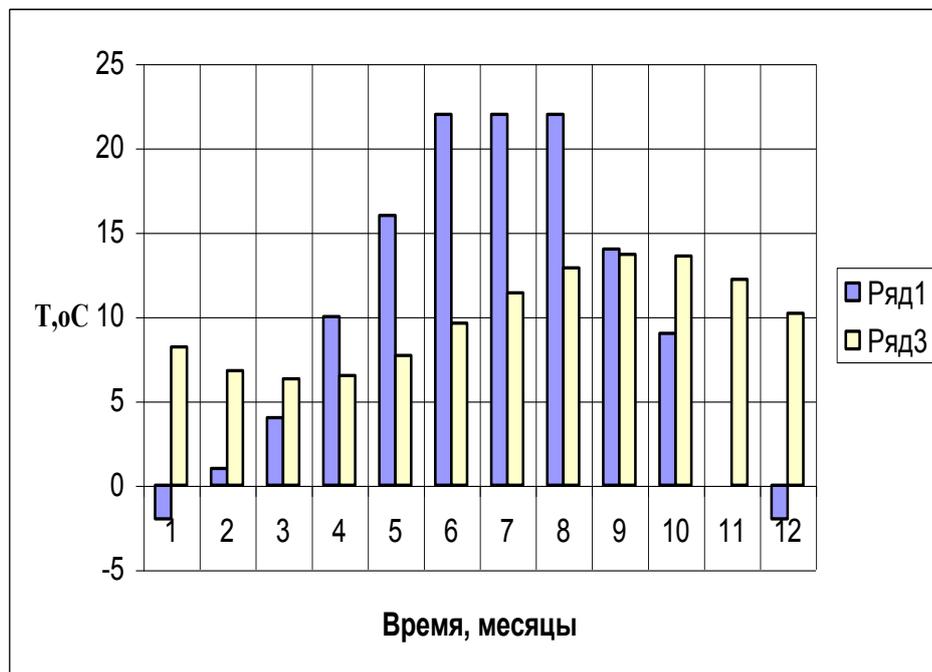


Рис. 17. Среднемесячные температуры грунтового основания в г. Львове за 2007 – 2008 годы.

Ряд 1 – на дневной поверхности; ряд 3 – на глубине 3,2 метра.

Среднегодовые температуры грунтового основания в районе г. Львова равны соответственно:

- на дневной поверхности $T_{\text{ср}} = 9,7^{\circ}\text{C}$;

- на глубине $h = 3,2\text{ м}$ $T_{\text{ср}} = 9,9^{\circ}\text{С}$.

Анализ кривых на рисунках 16 и 17 позволил нам сделать такие выводы:

- температура на дневной поверхности основания может принимать как отрицательные, так и положительные значения;
- температура основания на глубинах 1,6 и 3,2 метра принимает строго положительные значения;
- чем больше глубина, тем выше температура основания (здесь имеет место влияние идущего из центра Земли тепла);
- чем больше глубина, тем меньше амплитуда колебаний температуры основания.

Таким образом, температура грунтового основания на глубине более 1,6 метра как на западе, так и на востоке Украины всегда строго положительна.

В этой связи использование тепловых насосов в условиях Украины весьма перспективно. Уместно отметить, что этот вывод косвенно подтверждается тем, что тепловые насосы широко применяются в развитых европейских странах с климатом, похожим на украинский.

4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ. УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА. ГРАНИЧНЫЕ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ.

Если основание используется в качестве среды для коллектора теплового насоса, из него либо будет осуществляться отвод тепла (в тот период года, когда тепловая машина используется для отопления[10]) либо приток тепла (в тот период года, когда тепловая машина используется для кондиционирования[10]).

В этом случае важно правильно учитывать тепловые процессы, протекающие в грунтовом основании, и знать материальные константы, соответствующие данным процессам.

Поскольку известные работы в указанном направлении до сих пор носили скорее либо описательный, либо оценочный характер [10, 12, 18], остановимся на этом вопросе подробнее.

Если коллектор – теплообменник расположен внутри грунтового основания, в первом приближении задача исследований может быть сформулирована так.

Известны законы природного изменения температуры на верхней границе и внутри грунтового основания (т.е. по его глубине) в зависимости от времени года.

Внутри основания устроен либо плоский коллектор, либо U – образный коллектор - зонд, с использованием которого осуществляется теплообмен циркулирующей в нем с некоторой скоростью жидкости с основанием.

Эта жидкость, в свою очередь, используется для частичного подогрева (если тепловой насос используется для отопления) или частичного

охлаждения (если тепловой насос используется для нужд кондиционирования) тепловой машины.

Известны теплофизические свойства и скорость движения циркулирующей в тепловом коллекторе жидкости.

Известны наружный и внутренний диаметры труб, по которым циркулирует теплоноситель, а также его прочностные и теплофизические свойства.

Известны теплофизические свойства основания, внутри которого помещен коллектор, а также условия теплообмена на контакте между коллектором и основанием.

Требуется определить количество тепла, поглощенное (если имеет место процесс кондиционирования) или отданное (если имеет место процесс отопления) основанием (или системой «фундамент – основание») за некоторый расчетный период времени.

Кроме того, необходимо оценить экономическую эффективность данной системы отопления или кондиционирования или системы, с использованием которой кондиционирование и обогрев помещений осуществляется одновременно.

Если коллектор – теплообменник расположен в фундаментах здания или сооружения, в первом приближении задача исследований может быть сформулирована так.

Известны законы природного изменения температуры на верхней границе и внутри грунтового основания (т.е. по его глубине) в зависимости от времени года.

Известны конструкция, геометрия и отметки заложения подошвы и верхнего обреза фундаментов внутри грунтового основания.

Известны теплофизические и прочностные свойства материала фундамента.

Известен закон теплообмена на контакте «основание – фундамент».

В теле фундамента (или фундаментов) устроен либо плоский коллектор, либо U – образный коллектор - зонд, с использованием которого осуществляется теплообмен циркулирующей в нем с некоторой скоростью жидкости с материалом фундамента и далее – с основанием.

Эта жидкость, в свою очередь, используется для частичного подогрева (если тепловой насос используется для отопления) или частичного охлаждения (если тепловой насос используется для нужд кондиционирования) тепловой машины.

Также известны теплофизические свойства и скорость движения циркулирующей в тепловом коллекторе жидкости.

Известны наружный и внутренний диаметры труб, по которым циркулирует теплоноситель (т.е. жидкость), а также их прочностные и теплофизические свойства.

Известны теплофизические свойства основания, на которое опираются или в котором расположены фундаменты.

Требуется определить количество тепла, поглощенное (если имеет место процесс кондиционирования) или отданное (если имеет место процесс отопления) основанием (или системой «фундамент – основание») за некоторый расчетный период времени.

Кроме того, необходимо оценить экономическую эффективность данной системы отопления или кондиционирования или системы, с использованием которой кондиционирование и обогрев помещений осуществляется одновременно.

Для решения этой задачи необходимо также дать ответы на такие вопросы.

1. Каким образом наличие в теле фундаментов пластиковых труб скажется на их прочности?

2. Будет ли в процессе эксплуатации теплового насоса происходить промерзание основания? Иными словами, будет ли температура основания опускаться ниже нуля (если да, то следует ли учитывать морозное пучение основания при замерзании основания и просадку при его оттаивании).
3. Как охлаждение (или нагрев) основания повлияет на физические и механические свойства грунта?
4. Каким образом температурный режим основания будет сказываться на свойствах материала фундаментов?
5. Каким образом температурный режим основания будет сказываться на несущей способности фундаментов по материалу и грунту?
6. Как охлаждение (или нагрев) основания скажется на жизнедеятельности находящихся в нем насекомых и микроорганизмов (здесь мы сталкиваемся с проблемой экологии).

Далее рассмотрим уравнения тепло – массопереноса, принятые в настоящее время для расчета тепловых полей в грунтовых основаниях (и не только).

Согласно современным представлениям о природе распространения тепла, различают три основных вида теплопередачи в сплошных средах (в том числе в грунте):

- кондуктивную;
- конвективную;
- радиационную (т.е. теплопередачу излучением).

Для описания кондуктивной теплопередачи используют закон Фурье, который имеет вид [22]:

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dF \cdot dt, \quad (10)$$

где dQ - количество теплоты, прошедшее за время dt через элемент поверхности dF по нормали к ней; $\frac{\partial T}{\partial n} = grad(T)$ - температурный градиент;

T - температура; λ - коэффициент теплопередачи; t - время.

Пусть выполняются такие условия:

- по теплофизическим свойствам основание является однородным и изотропным;
- его теплофизические свойства основания слабо зависят от температуры;
- в основании отсутствуют фазовые переходы.

Тогда уравнение распространения в основании тепла за счет кондуктивного теплообмена имеет вид:

$$a \cdot \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (11)$$

где $a = \frac{\lambda}{\gamma \cdot c}$ - коэффициент температуропроводности; $\Delta = \nabla^2$ - оператор

Лапласа; γ - удельный вес грунта; c - его удельная теплоемкость.

В развернутом виде в декартовой системе координат уравнение теплопроводности имеет вид:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

В развернутом виде в цилиндрической системе координат уравнение теплопроводности имеет вид:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (13)$$

Если имеет место осевая симметрия, то уравнение (13) имеет вид:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (14)$$

В развернутом виде в сферической системе координат уравнение теплопроводности имеет вид:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} + \frac{\cos \psi}{r^2 \cdot \sin \psi} \cdot \frac{\partial T}{\partial \psi} + \frac{1}{r^2 \cdot \sin^2 \psi} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (15)$$

Здесь $x, y, z, r, \varphi, \psi$ - координаты в t - время.

Конвективная теплопередача имеет место в том случае, когда перенос энергии осуществляется движущейся жидкостью (или газом). В этом случае процесс переноса тепла через твердую преграду (стенку) за которой находится жидкость или газ подчиняется такой зависимости:

$$dQ = -\alpha \cdot (T_w - T_f) \cdot dF \cdot dt, \quad (16)$$

где α - коэффициент теплоотдачи; T_w - температура твердой стенки; T_f - то же, движущейся жидкости (или газа).

В общем случае коэффициент α является функцией многих переменных:

$$\alpha = f(W, T_w, T_f, \lambda, \mu, \rho, c, L_1, L_2, \dots), \quad (17)$$

где W - скорость движения жидкости (газа); μ - коэффициент ее (или его) вязкости; ρ - плотность; L_1 и L_2 - характерные размеры, определяющие условия движения жидкости.

В данном случае процесс теплопередачи в декартовой системе координат описывается системой уравнений вида [25, 26]:

$$\rho \cdot \frac{dW_x}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot g + \mu \cdot \left(\nabla^2 W_x + \frac{1}{3} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right);$$

$$\rho \cdot \frac{dW_y}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot g + \mu \cdot \left(\nabla^2 W_y + \frac{1}{3} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right);$$

$$\rho \cdot \frac{dW_z}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho \cdot g + \mu \cdot \left(\nabla^2 W_z + \frac{1}{3} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right);$$

$$\Theta = \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z};$$

$$\frac{dW_x}{dt} = \frac{\partial W_x}{\partial t} + W_x \cdot \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial W_x}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial W_x}{\partial z};$$

$$\frac{dW_y}{dt} = \frac{\partial W_y}{\partial t} + W_x \cdot \frac{\partial W_y}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial W_y}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial W_y}{\partial z}; \quad (18)$$

$$\frac{dW_z}{dt} = \frac{\partial W_z}{\partial t} + W_x \cdot \frac{\partial W_z}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial W_z}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial W_z}{\partial z};$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \left(\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} \right) + W_x \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$

$$W_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \Delta T;$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha \cdot (T_f - T_w). \quad (18)$$

Здесь W_x, W_y, W_z - проекции вектора скорости движения элементарного объема жидкости (газа) на координатные оси; P - давление в точке с координатами (x, y, z) ; $\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$ - оператор

Лапласа в декартовой системе координат.

Уравнения (18) следует использовать в том случае, когда теплообменник коллектора расположен ниже уровня подземных вод, и при этом нет возможности пренебречь сжимаемостью и скоростью движения жидкости.

Если объемные деформации жидкости весьма малы (при расчете грунтовых оснований ими обычно пренебрегают), то в (18) следует положить $\rho = 0$.

Для описания движения жидкости по трубам коллектора уравнения (18) использовать нецелесообразно ввиду их сложности. В трубопроводе коллектора жидкость обычно циркулирует с постоянной скоростью и

имеет место установившегося потенциального движения [25]. Поэтому в данном случае лучше использовать интеграл Бернулли вида:

$$P + \rho \cdot \frac{W^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z = C, \quad (19)$$

где P - давление; ρ - плотность теплоносителя; W - его эффективная скорость движения z - перепад высот.

Для оценки количества тепла, проходящего через стенку трубы теплового коллектора, следует использовать формулу [16]. При этом коэффициент теплоотдачи обычно определяют по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} \cdot Nu, \quad (20)$$

где L - характерный размер, а Nu - критерий Нуссельта.

В общем случае критерий Нуссельта сложным образом зависит от критериев Рейнольдса Re , Пекле Pe , Прандтля Pr , Грасгофа Gr и характерных размеров L_0, L_1, L_2, \dots , в силу чего для практических расчетов используют его различные аппроксимации.

Для практических расчетов при определении значения Нуссельта с учетом ламинарного движения теплоносителя (т.е. жидкости в коллекторе теплового насоса) обычно используют формулу Крауссольда [26]:

$$Nu = 13,2 \cdot Pe^{0,23} \cdot \sqrt{\frac{d^*}{L}}. \quad (21)$$

Здесь $Pe = \frac{W \cdot L}{a}$ - критерий Пекле; a – см. пояснения к формуле (11);

$d^* = \frac{D-d}{D}$, где D и d - соответственно наружный и внутренний диаметры,

а L - длина прямолинейного участка трубы коллектора.

Далее остановимся на процессе теплообмена, обусловленном излучением. Согласно [26], количество тепловой энергии в единицу времени, обусловленной механизмом излучения при теплообмене между двумя поверхностями с температурами T_1 и T_2 равно:

$$Q = 4,9 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \psi \cdot \varepsilon', \quad (22)$$

где Q - количество тепловой энергии в единицу времени, обусловленной механизмом излучения $\left[\frac{\text{ккал}}{\text{час}} \right]$; F - площадь одной из поверхностей; ψ - угловой коэффициент; ε' - приведенная степень черноты.

Для того чтобы оценить порядок энергии (22), определим ее количество, приходящееся на единицу поверхности параллельных бесконечных пластин, выполненных из одного материала (для определенности – кирпича при температуре). В данном случае $\psi = 1,0$.

Для определенности положим $T_1 = 20^0\text{C}$ и $T_2 = 2^0\text{C}$. Имеем:

$$\varepsilon' = \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon} - 1} = \frac{1}{\frac{2}{0,9} - 1} \approx 0,82; \quad (22)$$

$$Q^* = \frac{Q}{F} = 4,9 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \psi \cdot \varepsilon', \quad (23)$$

$$Q^* = \frac{Q}{F} = 4,9 \cdot \left[\left(\frac{20}{100} \right)^4 - \left(\frac{2}{100} \right)^4 \right] \cdot 1,0 \cdot 0,82 = 0,006 \left[\frac{\text{ккал}}{\text{час} \cdot \text{м}^2} \right]. \quad (24)$$

Поскольку полученная нами величина весьма мала, можно сделать вывод о том, что в рассматриваемом диапазоне температур ($0 \dots 20^0\text{C}$) рассматривать механизм теплообмена излучением нет смысла.

Далее рассмотрим условия на границе контакта слоев грунта с различными свойствами (см. также [20, 21]) и границе раздела сред, необходимые для расчета тепловых полей вокруг тепловых коллекторов. Наиболее распространенными являются:

1. Условие Дирихле:

$$T_W = f(x, y, t). \quad (25)$$

2. Условие Неймана:

$$\frac{\partial T_W}{\partial n} = f_1(x, y, t). \quad (26)$$

Здесь T_W - температура на границе; $\frac{\partial T_W}{\partial n}$ - производная от температуры по нормали к границе; $f(x, y, t)$ и $f_1(x, y, t)$ - некоторые функции координат x и y ; t - время.

3. Закон теплообмена Ньютона, см. (18).

4. Условия идеального температурного контакта на границе грунтовых слоев на глубине H (для простоты изложения положим их параллельными друг другу):

$$T_1(x, y, H, t) - T_2(x, y, H, t) = 0; \quad (27)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} - \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0.$$

Здесь λ_1 и λ_2 - коэффициенты теплопередачи грунтовых слоев; $T_1(x, y, H, t)$ и $T_2(x, y, H, t)$ - температура на контакте грунтовых слоев на глубине H ; x, y, z - координаты; t - время.

Далее рассмотрим начальные условия. При их определении необходимо знать температурные поля в момент включения теплового насоса.

В общем случае они имеют вид:

$$T(x, y, z, 0) = F(x, y, z), \quad (28)$$

где $F(x, y, z)$ - некоторая функция координат, характеризующая распределений температуры в основании в начальный момент времени.

В первом приближении для определения функции $F(x, y, z)$ можно использовать данные диаграмм на рисунках 16 и 17. При том для глубин, больших 3,2 метра, следует принимать температуру, равную температуре грунта на глубине 3,2 метра.

Изложенные в настоящем разделе материалы и изложенные в предыдущих разделах материалы исследований позволили нам сделать такие выводы.

1. Для расчета тепловых полей в грунтовом основании и теле фундаментов в первом приближении целесообразно использовать уравнения (10...16), и граничные условия (18, 23...27).
2. Для расчета параметров процесса движения теплоносителя в трубах теплового коллектора целесообразно использовать уравнение (19).
3. Для расчета напряженно – деформированного состояния ослабленных трубопроводами теплообменников фундаментов следует использовать элементы теорий упругости, пластичности, методы расчета бетонных и железобетонных конструкций. Поскольку методика расчета фундаментов по материалу разработана достаточно основательно, этот вопрос в настоящей монографии не рассматривается.
4. Тепловые насосы либо в режиме отопительного прибора либо в режиме кондиционера непрерывно эксплуатируются длительное время, которое составляет недели и месяцы. Поэтому для решения практических задач при определении начальных условий достаточно использовать данные диаграмм на рисунках 16 и 17.

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОСНОВАНИЯ ПЛОСКОГО КОЛЛЕКТОРА ТЕПЛООВОГО НАСОСА.

При написании настоящего раздела преследовалась цель установить, насколько реально использовать грунтовое основание в качестве накопителя тепловой энергии. Для определения порядка искомой величины достаточно рассмотреть одномерную (по координате) задачу.

Исследовалось температурное поле в центре параллельного дневной поверхности плоского коллектора неограниченных размеров в плане, расположенного в грунтовом основании на глубине h .

Задача исследований была сформулирована так. Известны температура на верхней (при $z=0$) $T_{v1}(t)$ и нижней границе (при $z=H$) $T_{v2}(t)$ грунтового основания (рис.19). Известно распределение температуры в основании по глубине $T_0(z)$ в момент времени $t=0$.

Известны плотность ρ и теплофизические характеристики основания (т.е. его удельная теплоемкость c_p и коэффициент теплопроводности λ).

На глубине h расположен коллектор теплового насоса (зимой) и кондиционера (летом), в котором постоянно поддерживается температура $T_w(t)$.

При этом между частями основания выше и ниже коллектора существует идеальный термический контакт [20,21].

Требуется определить, на сколько за некоторый расчетный период времени t_0 изменится тепловая энергия основания Q .

С физической точки зрения такая картина имеет место на вертикали, проходящей через центр неограниченного в плане плоского параллельного земной поверхности коллектора.

С математической точки зрения задача исследований сводится к решению уравнения теплопроводности вида:

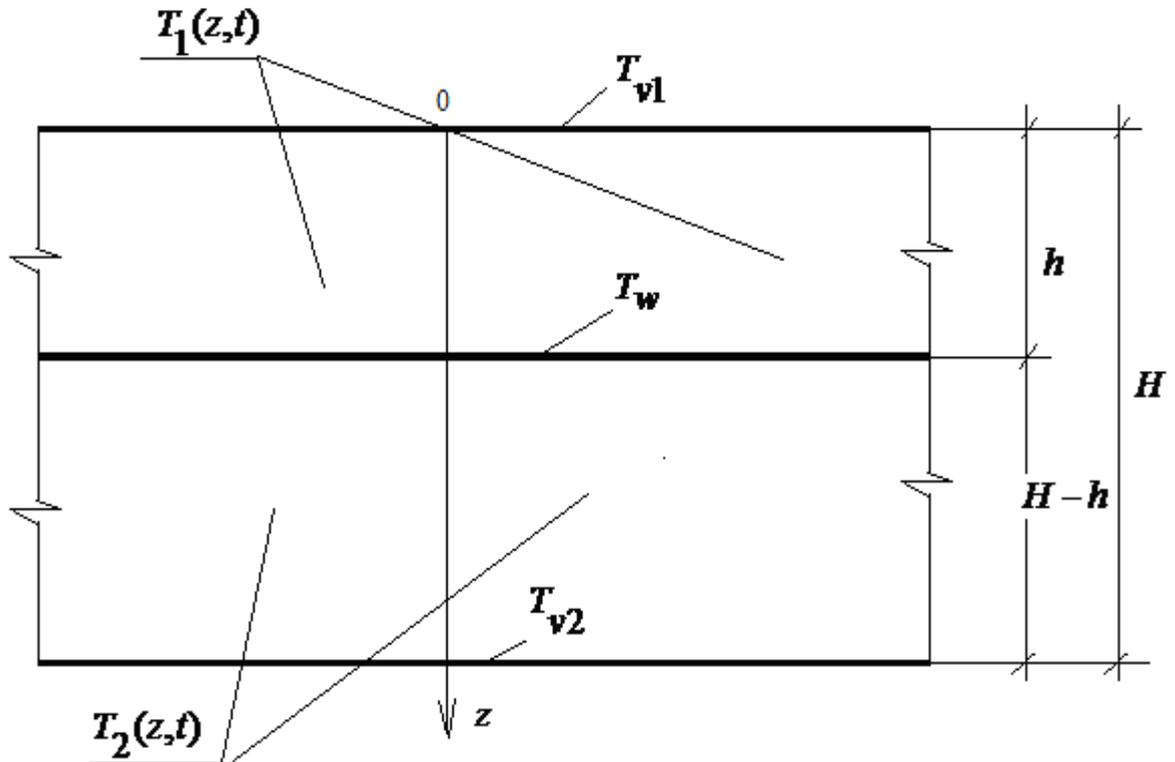


Рис. 18. К определению тепловой энергии основания.

$$a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (29)$$

при выполнении начального и граничных условий вида:

$$\left. \begin{array}{l} T_1(0, z) = T_0(z), \quad z \in (0, h); \\ T_2(0, z) = T_0(z), \quad z \in (h, H); \end{array} \right\} \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} T_1(t, 0) &= T_{v1}(t); \\ T_1(t, h) - T_2(t, h) - T_w(t) &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial z} T_1(t, h) - \frac{\partial}{\partial z} T_2(t, h) &= 0; \\ T_2(t, H) &= T_{v2}(t); \end{aligned} \right\}, \quad (30)$$

и далее вычисления интеграла вида

$$Q = \lim_{z \rightarrow h} \left\{ \int_0^t \lambda(z) \cdot \frac{\partial T(z, \xi)}{\partial z} \cdot d\xi \right\}. \quad (31)$$

Здесь Q - "закачанная" в основание за время t тепловая энергия, отнесенная к одному квадратному метру коллектора; $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ - [22].

Уравнение (29) было получено из (12) при $x=0$ и $y=0$.

Для нахождения оценочных величин упростим задачу исследований, положив в (29):

$$\left. \begin{aligned} T_1(0, z) &= 0 \quad \text{при} \quad z \in (0, h); \\ T_2(0, z) &= 0 \quad \text{при} \quad z \in (h, H); \\ T_1(t, 0) &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned}
 T_w(t) &= T_w = \text{const}; \\
 T_1(t, h) - T_2(t, h) - T_w &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial z} T_1(t, h) - \frac{\partial}{\partial z} T_2(t, h) &= 0; \\
 T_2(t, H) &= 0; \\
 H &= \infty.
 \end{aligned} \right\}. \quad (32)$$

Эти условия гораздо жестче условий (31), например, потому что летняя температура дневной поверхности $T = 0$ - нонсенс.

Решение уравнений (29) и (31) с начальными и граничными условиями (32) имеет вид:

$$Q = \frac{\lambda \cdot T_w \cdot h}{a} \cdot \left\{ \sqrt{\frac{a \cdot t}{\pi \cdot h^2}} \cdot \left[1 + \exp\left(-\frac{h^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) \right] - \text{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{a \cdot t}}\right) \right\}. \quad (33)$$

Здесь $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$ - дополнительный интеграл вероятности [23].

Для анализа (33) положим $\xi = \sqrt{\frac{a \cdot t}{h^2}}$ и $Q^* = \frac{Q \cdot a}{\lambda \cdot T_w \cdot h}$. Имеем:

$$Q^* = \frac{\xi}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\xi^2}\right) - \text{erfc}\left(\frac{1}{\xi}\right). \quad (34)$$

Зависимость (34) представлена на рисунке 19.

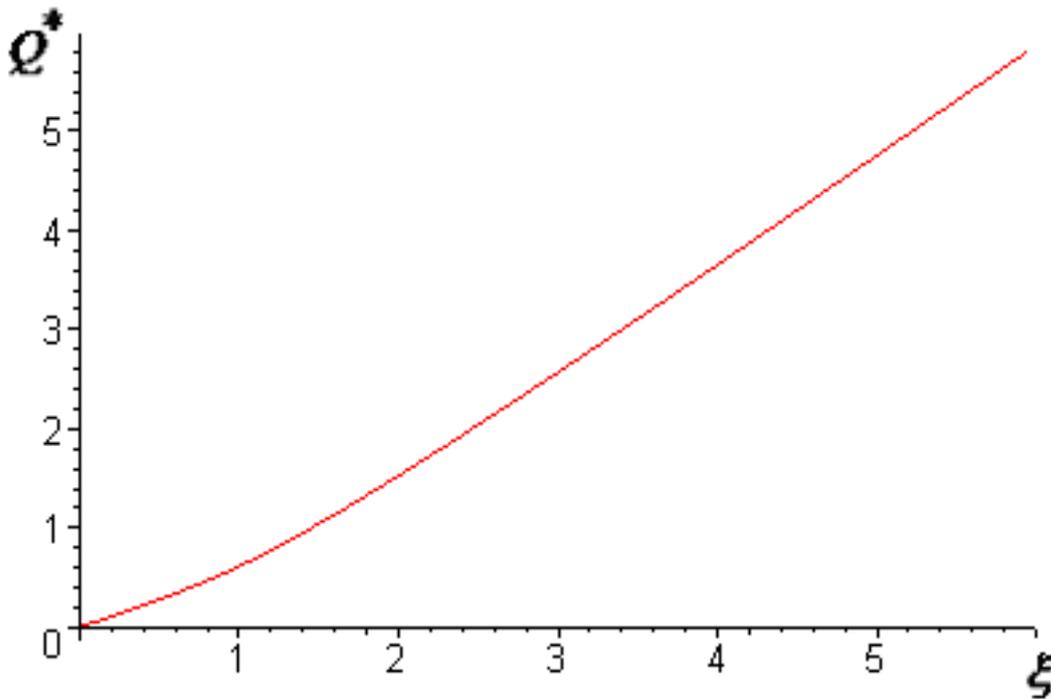


Рис. 19. Зависимость безразмерной тепловой энергии Q^* от безразмерного времени ξ .

Ее анализ позволил нам сделать вывод о том, что начиная со значения $\xi = 1,1$ она является практически линейной.

Далее нами был выполнен численный эксперимент, условия проведения и результаты которого представлены в таблице 1.

При его проведении преследовалась цель выявить, какой порядок имеет величина «закачанной» в основание за весенне – летний период тепловой энергии.

В ходе эксперимента исследовались потоки тепловой энергии в основании из сухого песка и обычного (с точки зрения теплофизических свойств грунта).

В целом, изложенные в настоящем разделе материалы исследований

Таблица 1

Условия проведения и результаты численного эксперимента

Наименование характеристики	Единица измерения	Наименование грунта	
		Песок сухой	Грунт под зданием
Плотность ρ	$кг/м^3$	1735	1980
Удельная теплоемкость c_p	$кДж/(кг \cdot град)$	0,84	1,13
Коэффициент теплопроводности λ	$вт/(м \cdot град)$	0,58	1,16
Глубина размещения коллектора h	М	5	5
Температура коллектора T_w	Град С	15	15
Время работы коллектора t	Месяцы	4	4
Тепловая энергия основания Q	$МДж$	29	44

Примечание. В качестве исходных использованы данные [24].

позволили нам сделать такие выводы.

1. Получено замкнутое решение задачи о нагнетании избыточной тепловой энергии в грунтовое основание с использованием параллельного дневной поверхности плоского коллектора.

2. Показано, что в зависимости от грунтовых условий и глубины расположения коллектора на одном квадратном метре основания за весенне - летний период можно накопить 29...44 МДж тепловой энергии.

6. ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ НУЖД ОТОПЛЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ.

В качестве примера устройства и эксплуатации фундаментов, в которых были расположены коллекторы тепловых насосов, рассмотрим изложенный в работах [11, 12, 13] опыт возведения семиэтажного здания, два этажа которого расположены ниже уровня земной поверхности.

Этот пример поучителен с той точки зрения, что в процессе строительства и эксплуатации здания были выполнены такие исследования:

- измерение температурных полей основания;
- измерение температуры свай;
- определение напряжений по подошве и острию свай в процессе строительства и эксплуатации здания;
- определение влияния состава бетона, из которого изготовлены сваи, на температурные поля в грунтовом основании в процессе твердения бетона.

Здание имеет строительный объем 97 тыс. куб.м. и общую площадь 21,5 тыс. кв. м. Оно расположено на склоне.

В нем находятся плавательный бассейн и фитнес - центр.

Исследования на стадии проекта позволили авторам проекта сделать вывод о том, что эксплуатационные расходы по содержанию здания могут быть существенно сокращены за счет использования тепла Земли для нужд его отопления и кондиционирования.

Фундаменты были устроены из 175 буровых свай диаметром 1,2 м.

Устройство свай осуществлялось с использованием обсадной трубы. Они выполняли функции фундаментов здания и удерживающих конструкций стенок котлована глубиной 14 м.

Поскольку здание строилось на склоне, сваи погружались на разную глубину, которая изменялась в зависимости от характера рельефа и характеристик грунта в месте их устройства. Длина свай, которые использовались в качестве фундамента, равнялась 9...11 метров, а длина свай, которые использовались в качестве удерживающих конструкций – 9...18 м. Кроме того, подпорные стены из свай усиливались предварительно напряженными грунтовыми анкерами.

В 143 сваях были установлены теплообменники (т.е. коллекторы), которые использовались при работе тепловой машины в реверсном режиме (т.е. либо для обслуживания тепловых насосов во время отопительного периода либо для обслуживания кондиционеров в весенне – летний период).

Часть коллекторов отопительной (или кондиционирующей) системы была установлена в сваях удерживающих конструкций.

Отопительная система имеет такие технические данные:

- общая длина свай, в которых установлены теплообменники равна 2050 метров;
- длина труб теплового коллектора, установленного в каждой из свай равна 260-290 метров, а их диаметр - 25 мм;
- теплоноситель состоит из 70 % воды и 30 % антифриза.

Общая длина трубопровода, установленного в сваях, составила приблизительно 40 тыс. м. Перед монтажом арматурного каркаса было проведено испытание трубопроводов теплообменников повышенным давлением.

Грунты основания рассматриваемого здания сложены, в основном, суглинками. Грунтовые воды залегают ниже уровня дневной поверхности земли на 4...5 м.

Мониторинг устойчивости подпорных стен осуществлялся с самого начала строительства.

Для исследования процесса теплообмена в грунтовом основании были изготовлены специальные экспериментальные сваи.

Расчетная нагрузка на сваю длиной 9 метров равнялась 2000 кН.

Первые измерения были проведены зимой 1996...1997 годах.

После открытия оздоровительного центра сваи были полностью включены в работу.

Исследования показали, что напряжения в голове и по острию исследуемой сваи изменяются с течением времени.

К осени 1996 года возведение здания было закончено. При этом нагрузка на фундаменты составила 90 % от проектной.

В результате выполненных в ходе возведения и эксплуатации здания было авторами проекта исследований установлено следующее.

1. После прекращения строительства нагрузка на острие сваи оставалась постоянной во времени независимо от изменений температурных полей как в самой свае, так и в прилегающем к ней грунтовом массиве.
2. Охлаждение грунта ниже 0°C в результате работы теплового насоса недопустимо, т. к. в этом случае в основании происходит образование ледяных линз, что ведет к разрушению природной структуры грунта и как следствие – к снижению его прочностных свойств.
3. Эффективная работ системы отопления (или

кондиционирования) имеет место, если разница температур жидкости на входе и выходе составляет около 2 °С. При этом изменение температуры грунта, а, следовательно, и подземных вод, не должно превышать 5°С, так как в результате повышения или понижения температуры в грунтах начинают протекать химические реакции.

В целом, опыт строительства здания позволил сделать вывод о том, что при работе тепловой машины в реверсном режиме для нужд и отопления и кондиционирования появляется возможность значительной экономии средств по сравнению с режимом ее работы в аверсном режиме (т.е. либо только для нужд отопления либо только для нужд кондиционирования).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в настоящей монографии материалы позволили нам сделать такие выводы.

1. Энергетическая безопасность Украины является предметом постоянной заботы ее руководства.
2. Существует эффективная инновационная технология, позволяющая в 2,5...4,5 раза и более сократить потребление электрической энергии для нужд отопления и кондиционирования.
3. Эта технология базируется для использования для нужд отопления и кондиционирования так называемых тепловых насосов.
4. Тепловые насосы получили широкое распространение в бедных топливными ресурсами экономически развитых странах (Австрия, Япония) и в странах с высокими требованиями к экологии производств (Швеция).
5. В пользу использования этой технологии в условиях Украины свидетельствует структура энергетических источников в стране (некоторый избыток электрической энергии) и температурный режим основания (раздел 3), а также полученные нами оценки (раздел 5).
6. Существуют пути дальнейшего удешевления затрат на отопление и кондиционирование зданий и сооружений путем использования для функционирования тепловых насосов «ночной энергии» и их работа в реверсном режиме.
7. Для нужд проектирования коллекторов тепловых насосов, которые находятся в грунтовых основаниях и фундаментах, необходимо решить такие новые задачи механики грунтов и фундаментостроения:

- расчет температурных полей и потоков тепловой энергии в теле фундаментов и грунтовом основании;
- расчет напряженно – деформированного состояния конструкций, совмещающих функции фундаментов и теплообменников;
- разработка новых конструкций, совмещающих функции собственно фундаментов и теплообменников;
- разработка и дальнейшее развитие методов определения теплофизических констант грунтовых оснований, в том числе водо – и неводонасыщенных).

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон України №30 від 01.07.94 “Про енергозбереження”.
2. Наказ Держкомбуду України №5 від 10.01.1995 “Про реалізацію заходів про впровадженню у проєктуванні та житлово – цивільному будівництві енергоефективних огороджуючих споруд”.
3. Наказ Держкомітету України з енергозбереження №10 від 06.03.96 “Про типові положення про підрозділ з енергозбереження в галузевому міністерстві і відомстві”.
4. Наказ Мінохорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України №55 від 07.06.95 “Про затвердження інструкції про здійснення державної екологічної експертизи”
5. Наказ Державного комітету України з знергозбереження №78 від 15.09.1999 “Про затвердження порядку організації та проведення енергетичних обстежень бюджетних установ, організацій та казенних підприємств”
6. Наказ Держкомбуду України №131 від 26.09.1998 “Про створення центру з енергозбереження в будіндустрії і промисловості будівельних матеріалів при Держбуді України”
7. Закон України №1869-IV від 24.06.2004 “Про загальнодержавну програму реформування і розвитку ЖКГ на 2004-2008 роки”
8. Рішення НТР №49 від 15.10.2004 “Про проект середньострокових пріоритетних напрямків в будівельній галузі України на 2004-2007 роки”
9. Указ Президента Украины от 08.11.2007 “О мероприятиях по строительству доступного жилья в Украине и улучшению обеспечения граждан жильем”.
10. Популярная механика, №8 (70). - М., 2008. - с. 78...81.
11. Пономарев А.Б., Атаманов А.А. Энергетические фундаменты.// Строительная наука и техника.- 2008. -№4, с. 57-61.

- 12.Brandi, H. Energy foundation and other thermo – active ground structures. *Geotechnique* 56. – 2006. - №2. – pp. 81-122.
- 13.Brandi, H. Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground. *Proceeding of the 3-th international Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*. Ghent. Technical University, Vienna, Austria – 1998 – pp. 38-60.
- 14.Популярная механика, №7 (45). - М., 2006. - с. 28-30.
- 15.Популярная механика, №5 (67). - М., 2008. - с. 89-91.
- 16.Химическая энциклопедия. Том. 5. –М.: Издательство «Большая российская энциклопедия», - 1998, с.55-56.
- 17.Черная К. В. Использование конструкций фундаментов глубокого заложения при извлечении геотермальной энергии. //Світ геотехніки. №1, 2006, с. 27...31.
- 18.Беляев Н.М. Термодинамика. - Киев: Вища школа, 1987. - 344 с.
- 19.Шаповал В.Г., Моркляник Б.В., Шаповал А.В. О целесообразности использования грунтовых оснований в качестве накопителей тепла. //Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). Вип. 22. Полтава, 2008 – с. 138-142.
- 20.Новацкий В. Теория упругости. - М.: Мир, - 1975. - 872 с.
- 21.Шаповал В.Г. Прогноз осадок и кренов фундаментов на пылевато – глинистом основании, находящихся под воздействием статической и циклической нагрузки: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Днепропетровск, 1996. - 350 с
- 22.Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. - М.: Высш.шк., 1985. - 480 с.
- 23.Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1974. - 840 с.

24. Дыховичный Ю.А. и др. Справочник инженера-конструктора жилых и общественных зданий.-М.: Стройиздат, 1975., с. 386.
25. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. –М., Наука, 1976 – 888 с.
26. Машиностроение. Энциклопедический справочник. т. I. - М., 1947. - 456 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	2
1. Общие сведения	4
2. Устройство тепловых насосов. Способы и варианты размещения коллекторов тепловых насосов в различных средах	7
3. Методы оценки эффективности применения тепловых насосов для нужд отопления, принятые в промышленно развитых странах	27
4. Постановка задачи расчета оснований и фундаментов тепловых насосов. Уравнения тепломассопереноса. Граничные и начальные условия.	34
5. Пример расчета основания плоского коллектора теплового насоса.	46
6. Зарубежный опыт использования тепловых насосов для нужд отопления и кондиционирования.	52
7. Заключение	56
Литература	58
Оглавление	61