

Основы методики проектирование теплонасосных систем с горизонтальными грунтовыми теплообменниками

**Волов Г.Я., инж, к.т.н.
(ОДО «Энерговент»)**

Данная статья является продолжением серии статей, описывающих работу тепловых насосов [7]. В настоящей статье излагаются основы методики проектирования (расчета) тепловых насосов с горизонтальными грунтовыми теплообменниками, нашедших широкую популярность в развитых странах.

С точки зрения специалиста по отоплению, грунт является неиссякаемым источником тепловой энергии. Отобрать геотермальное тепло (теплота грунта) можно лишь с помощью тепловых насосов. Тепловой насос - это аппарат, который позволяет передавать теплоту от холодного (низкотемпературного) источника к теплomu (высокотемпературному) потребителю. Тепловые насосы, которые используют для отбора тепла грунта, иногда называют грунтовыми. Это понятие довольно условное, т.к. один и тот же тепловой насос может быть использован, как для отбора теплоты грунта, так для отбора теплоты от воды, да и из воздуха.

При отборе теплоты Земли используют ее верхний слой, находящиеся на глубине до 100 метров от поверхности. С точки зрения теплообмена этот слой грунта находится под воздействием лучистой энергии Солнца, радиогенного тепла из глубинных слоев Земли, конвективного теплообмена с атмосферным воздухом и теплопереноса за счет различных массообменных процессов (дождь, таяние снега, грунтовая вода и т.д.).

В зарубежной литературе существует несколько различных классификаций грунтов. Нам, в большей степени, интересуют классификация грунтов по их теплопроводности. В нижеприведенной таблице 1 используется данные известного американского справочника ASHRAE [3].

Таблица 1.

Классификация грунта по [3]

Класс грунта	λ , Вт/(м*°С)	Тип грунта
Очень низкая теплопроводность	<1	Легкая глина (15% влажность)
Низкая теплопроводность	<1,5	Тяжелая глина (5% влажность)
Нормальная теплопроводность	<2	Тяжелая глина (15% влажность) Легкий песок (15% влажность)
Высокая влажность	<2,5	Тяжелый песок (5% влажность)
Очень высокая теплопроводность	>2.5	Тяжелый песок (15% влажность)

В российских источниках нами обнаружены таблицы 3 СНиП 2.02.04-88 [4], на основе которой можно составить таблицу 2 по определению теплопроводности талого грунта - λ_{th} .

Таблица 2.

Классификация грунта по [4]

Класс грунта	λ , Вт/(м*°С)	Тип грунта
Очень низкая теплопроводность	<1	Заторфонные грунты и торфы
Низкая теплопроводность	<1,5	Суглинки и глины, супесь пылеватая, легкая супесь пылеватая
Нормальная теплопроводность	<2	Тяжелая супесь пылеватая Легкий песок
Высокая влажность	<2,5	Тяжелый песок (5% влажность)
Очень высокая теплопроводность	>2.5	Тяжелый песок (15% влажность)

Из сравнения таблиц 1 и 2 видно, что данные американских и российских справочников довольно адекватны. Для точного определения теплопроводности грунтов необходимо проводить экспериментальные исследования теплопроводности в месте предполагаемого строительства.

Отметим, что теплопроводность грунта не является величиной постоянной в течение года. Она зависит от влажности, агрегатного состояния влаги в грунте и температуры. Причем особенно сильно влажность меняется при замерзании грунта. Данные [4] говорят о том, что теплопроводность мерзлых грунтов λ_f составляет

$$\lambda_f = 1.05 \dots 2.1 * \lambda_{th}. \quad (1)$$

О температуре грунта на различной глубине у автора есть лишь данные из зарубежных источников (см. рис.1 [1]). Из этих данных можно сделать вывод, что на глубине более 8 метров температура практически постоянна в течение года (изменения составляют только 1/20 изменений на поверхности). За границей существует такое понятие, как температура грунта. Справочник ASHRAE [3] предлагает определять температуру грунта по температуре грунтовых вод в данной местности. Если исходить из температуры грунтовых вод, то она колеблется в пределах 8-10°С для условий Беларуси.

Значение количества радиогенной теплоты составляет (для зоны Центральной Европы) 0,05-0,12 Вт/м² [2]. Если оно не известно, то обычно принимается 0,1 Вт/м².

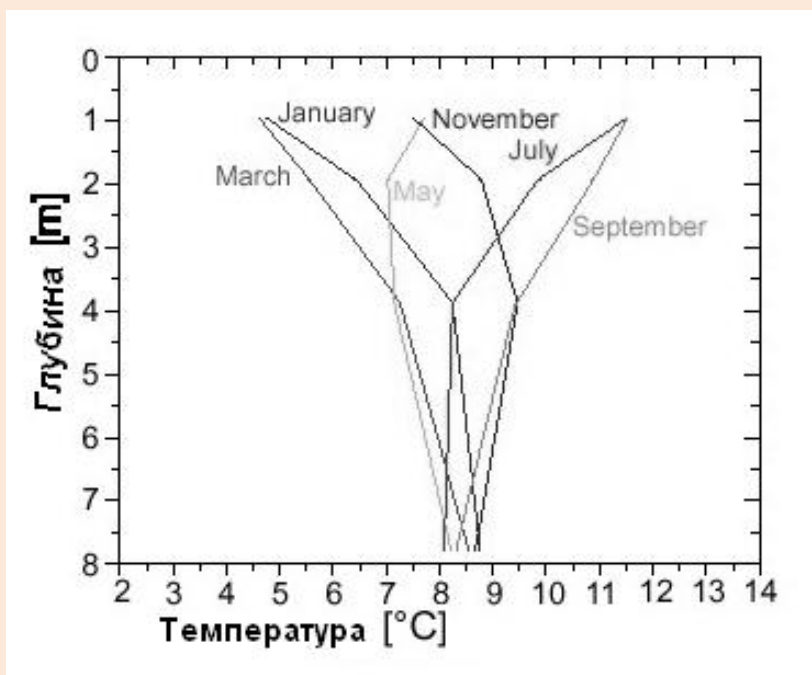
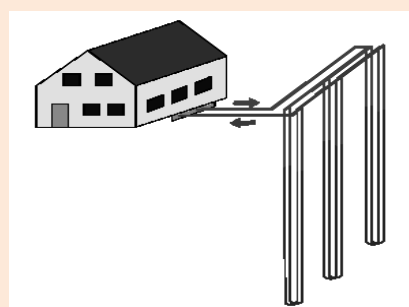
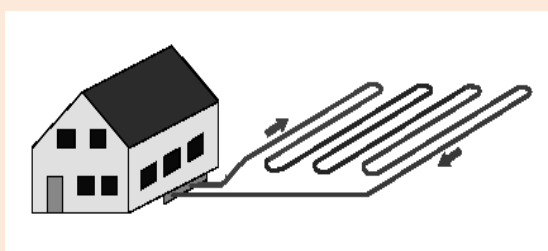


Рис. 1. Распределение температур грунта по глубине.

Существует два основных способа отбора геотермального тепла – с помощью открытых и закрытых контуров. Под открытым контуром понимают использование теплоты грунтовых вод, предусматривающих доставку этих вод на поверхность, использования их теплоты и возврат в пласт. Под закрытым контуром понимают использование теплоты грунта с помощью промежуточных теплообменников и теплоносителей. В свою очередь системы с закрытыми контурами различают по типу теплообменников – горизонтальные (рис. 2а) и вертикальные (рис.2в). Устройство закрытых контуров с вертикальными теплообменниками дороже, чем с горизонтальными теплообменниками. В тоже время контура с горизонтальными теплообменниками занимают большие площади, что может оказать в некоторых случаях весьма критичным условием.

А.

В.



С

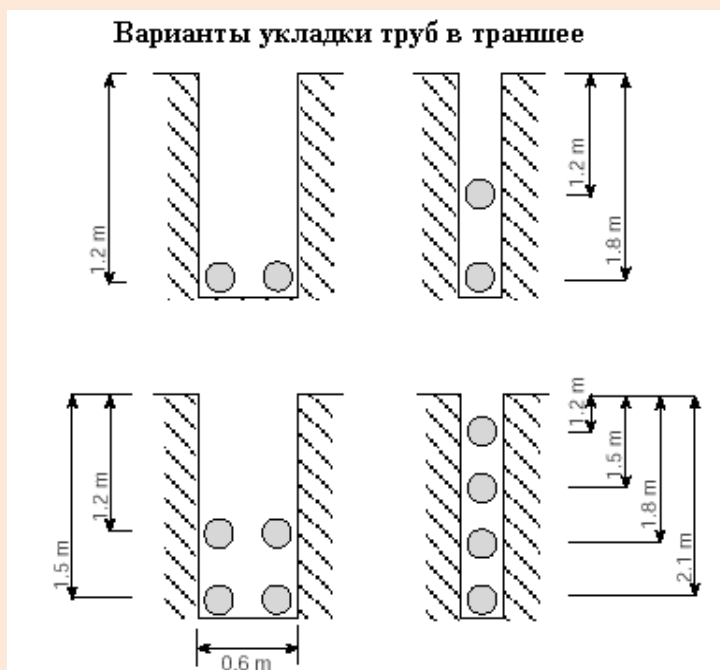


Рис. 2. Разводка труб горизонтального (А), вертикального (В) грунтовых теплообменников и варианты укладки горизонтального теплообменника в траншею (С) [6]

Трубы горизонтальных теплообменников размещают в траншеях. Размещение труб в траншее обычно выполняется двумя основными способами: прямые и свитые в спираль трубы. В жизни существуют и другие, иногда довольно экзотические, способы, например, трубопроводы, прикрывают сверху медными пластинками (copper fins) – видимо для улучшения теплообмена.

В этой статье мы не смогли обойти вниманием такой вопрос, как выпор типа тепловых насосов. Рассмотрим здесь несколько важных характеристик тепловых насосов: теплопроизводительность, COP – коэффициент трансформации, температура теплоносителя на входе в конденсатор (или же температуру конденсации, которая на 10°C выше) и температура антифриза на выходе из испарителя. Для стандартных условий все эти значения дает завод-изготовитель теплового насоса. Из всего ряда фирм выберем известную французскую фирму CIAT. В таблице представлены данные, взятые из справочника для теплового насоса LGN-100Z этой фирмы. Тепловой насос LGN-100Z использует в качестве хладагента R407с. Из этой таблицы легко получить значение COP, которое равно

$$\text{COP} = Q_h / N. \quad (2)$$

На рисунке 3 приведены графики зависимости коэффициента трансформации от температуры воды (антифриза) на выходе из испарителя.

Таблица 3.

**Характеристики теплового насоса LGN 100Z
(при температуре конденсации 55°C)**

Температура воды на выходе из испарителя, °C		Qс, кВт	N, кВт	Qh, кВт	COP
Водно-гликолевая смесь	-8	13,8	9	22,8	2,53
	-4	16	9,1	25,1	2,76
	2	20,4	9,4	29,9	3,18
Вода	5	23,2	9,5	32,7	3,44
	7	25	9,5	34,6	3,64
	12	30	9,6	39,6	4,16

Выбор теплового насоса на стадии проектирования не является простой задачей. Это связано с тем, что тепловой насос никогда не подбирают на полную пиковую отопительную нагрузку. Если это сделать, то капитальные затраты будут так велики, что окупаемость вашего решения не наступит никогда. Понятно, что выбрав тепловой насос не на пиковую нагрузку, необходимо будет предусмотреть специальный пиковый доводчик. В качестве последнего обычно применяют электродкотлы. И здесь возникает вопрос: «На какую нагрузку подбирать тепловые насосы?».

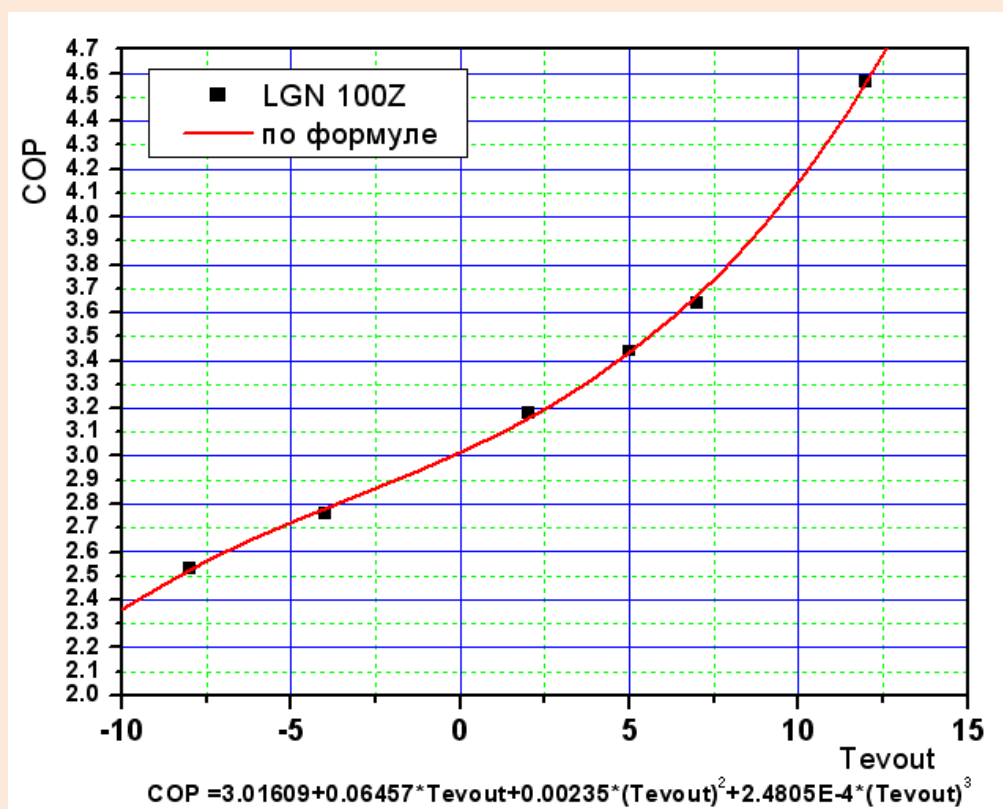


Рис.3. Тепловой насос CIAT марки LGP.

Моделирование работы теплового насоса вместе с грунтовым теплообменником может быть проведено с помощью программы по имитационному моделированию – МОДЭН, разработанной ОДО «Энерговент» [8]. На основании многочисленных компьютерных экспериментов и сравнения полученных данных с известными зарубежными методиками, а также учитывая опыт устройства теплонасосной установки с грунтовыми теплообменни-

ками на водозаборе Мухавецкий (Брест), в ОДО «Энерговент» были подготовлены рекомендации по проектированию таких систем. В настоящей статье мы воспользуемся лишь некоторыми данными из этих рекомендаций.

Для наглядного показа этого факта рассмотрим как ведет себя горизонтальный теплообменник, состоящий из двух труб $D_{нар}=32$ мм уложенных в траншею длиной 100м. Зададимся начальной температурой грунта 10°C и температурой антифриза равной минус 10°C и начнем отбирать тепло грунта (теплопроводность грунта принята равной $3 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$).

Еще один вопрос. Какой мощностью, как теплоисточник, обладает в процессе работы теплового насоса грунт? Для ответа на этот вопрос проведем компьютерный эксперимент.

На рисунке 4 приведены результаты компьютерного эксперимента, выполненного в рамках программы МОДЭН (версия 2.1). Начинается эксперимент 1 ноября и заканчивается 1 марта.

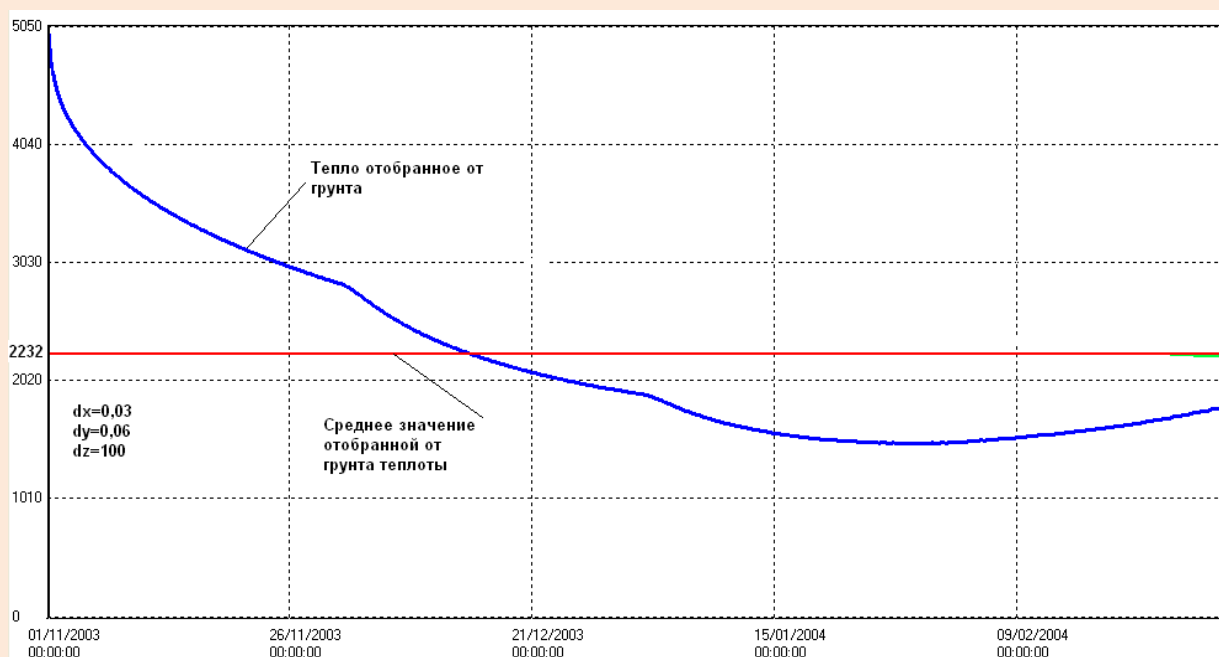


Рис. 4. Результаты компьютерного эксперимента, выполненного с помощью программы МОДЭН

Проанализируем график. На первой стадии можно отобрать более 4000 Вт, но этот период длится недолго далее происходит падение до 1500 Вт, а затем опять начинается небольшой рост. Падение теплоотбора связано с охлаждением грунта (работа теплообменника и понижение температуры наружного воздуха), а рост обусловлен увеличением солнечной радиации и некоторым ростом температур наружного воздуха. Средний же отбор за расчетный период составит $Q_{ср}=2232$ Вт. Собственно этим расчетным отбором теплоты мы и обладаем. В какие-то часы его можно превысить, в какие-то наоборот, но средний отбор не должен превышать этой цифры. Для нахождения значения требуемой мощности теплового насоса воспользуемся довольно простой методикой очень распространенной в США.

Определяем число часов использования максимума тепловой мощности

$$\tau_{\max} = Q_{\text{год}} / Q_{\max} \quad (3)$$

Коэффициент загрузки

$$K_{загр} = \tau_{max} / \tau_{год}. \quad (4)$$

Расчетная мощность теплового насоса в зарубежной литературе предлагается определять по формуле

$$Q_{тн} = 2 * Q_{max} * K_{загр}. \quad (5)$$

Коэффициент 2 в этой формуле учитывает тот факт, что продолжительность отопительного периода составляет, приблизительно, 50% всего года. Сейчас мы не будем ставить под сомнение эту формулу, хотя, несомненно, она нуждается в уточнении.

Мощность грунтового теплообменника рассчитывается по простой формуле

$$Q_{гт} = Q_{тн} * (COP - 1) / COP \quad (6)$$

Как уже было ранее сказано, трубопроводы горизонтального теплообменника укладывают в траншеи. Число труб в траншее может быть различным (1, 2, 4, 6, 10 и т.д.), как и расстояние между траншеями. Почему бы не уложить все трубы в одну траншею? Заманчивость такого предположения ошибочна потому, что как между близко лежащими трубами, так и между траншеями может возникнуть интерференция, т.е. наложение температурных полей, приводящая к существенному снижению теплового потока от грунта к трубам. Поэтому, если предположить, что труб, уложенных в одиночную траншею с одной трубой необходимо $L_{тр1}$, то число труб в реальных условиях равно

$$L_{тр} = L_{тр1} * K_{тр} * K_{тран}, \quad (7)$$

здесь

$K_{тр}$ – поправочный коэффициент, учитывающий число труб в траншее (см. табл. 4),

$K_{тран}$ – поправочный коэффициент, учитывающий расстояние между траншеями, расчеты показывают, что если расстояние между траншеями более 2 м, то $K_{тран} = 1$.

В общем случае

$$L_{тр} = F(K_{тр}, K_{тран}, T_{гр}, T_{ж}, \lambda_{th}, C_{гр}, D_{нар}, \lambda_{ст} \dots) . \quad (8)$$

Учесть все факторы путем введения коэффициентов (типа $K_{тр}$ и $K_{тран}$) не всегда представляется возможным. Наиболее предпочтительным является прямой расчет для соответствующих условий. В настоящее время такой прямой проверочный расчет может быть выполнен с помощью программ имитационного моделирования. Проведя ряд таких расчетов, мы хотим показать читателю статьи влияние отдельных параметров на величину теплоотбора теплообменником.

Влияние температуры грунта, теплопроводности грунта и температуры антифриза (теплоносителя циркулирующего через испаритель теплового насоса) может быть оценено с помощью таблицы 5. Из таблицы видно, что температура теплоносителя очень сильно влияет на величину теплоотбора, далее следует теплопроводность грунта и его температура, которая в наименьшей степени влияет на эту величину. Хотя полученные данные получены в результате численного расчета, автор не совсем четко понимает, почему так невелико влияние коэффициента теплопроводности? Я представлял, что это будет прямо пропорциональная зависимость, как в случае стационарной задачи теплопроводности. В просмотренных мной зарубежных источниках эта зависимость не обсуждается на численном уровне.

Таблица 4.
Поправочный коэффициент на число труб в одной траншее - $K_{тр}$

Основание	Число труб в траншее		
	2	4	6
Расчет по программе МОДЭН	1,45	1,97	2,34
[5]	1,43	1,73	2,16

Таблица 5.
Теплоотдача горизонтального грунтового теплообменника из 2-х труб при длине траншеи 100 м

Тгр, °С	λ_{th} , Вт/(м*°С) при Тж=-10 °С		λ_{th} , Вт/(м*°С) при Тж=-6 °С		λ_{th} , Вт/(м*°С) при Тж=-2 °С	
	1,5	3	1,5	3	1,5	3
8	1839	2287	1307	1561	794	833
10	1951	2391	1428	1674	897	958

Пример. Рассчитать горизонтальный грунтовой теплообменник и подобрать тепловой насос для отопления здания расположенного в Минске. Расчетная нагрузка на систему отопления составляет 80 кВт, теплопроводность грунта равна 3 Вт/(м*°С).

1. Для Минска при работе системы отопления при наружной температуре ниже +8°С, значение числа часов максимума равно 2320 (рассчитано в программе МОДЭН), при этом коэффициент загрузки равен 0,264. Определяем требуемую мощность тепловых насосов по формуле (5)

$$Q_{тн} = 120 * 0,264 * 2 = 63,3 \text{ кВт.}$$

2. Для того, чтобы принять наиболее эффективный вариант установки, проведем ряд расчетов на различные значения числа труб в траншее (1, 2 и 4) и температуры антифриза (-10, -6 и -2°С). Покажем как проводится один из расчетов: одна труба в траншее и температура антифриза -10°С

3. Принимаем к установке тепловой насос фирмы CIAT марки LGN. Для таких тепловых насосов по графику на рис. 3 выбираем COP, который будет равен 2,35.

Исходя из формулы (6) мощность грунтового теплообменника составит

$$Q_{гт} = 63,3 * (2,35 - 1) / 2,35 = 36,36 \text{ кВт.}$$

4. Как видно в таблице 5 нет данных по теплоотдаче в траншее с одиночной трубой. Поэтому берем аналогичную траншею, но с 2-мя трубами. Среднее значение отобранной теплоты со 100 м траншеи, за отопительный период равно 2391 Вт. На 100 м трубы тепло-съем составит

$$2391/2=1196 \text{ Вт/100м.}$$

5. Если в траншее лежит не 2, а только одна труба, то теплосъем с учетом $K_{тр}$ состав-
вит

$$1196*1,45=1730 \text{ Вт/100м.}$$

6. Общая длина труб и траншеи составит

$$L_{тр}=L_{тран}=36360*100/1730=2098 \text{ м.}$$

7. Результаты расчета заносим в таблицу 6.

8. Расход электрической энергии определяем по формуле

$$N_{год}= N_y*2320*2$$

9. Анализ результатов расчета показывает, наиболее экономичным, по статье капитальных затрат, являются варианты с температурой антифриза равной -10°C . Это варианты с минимальным количеством труб и большим типоразмером теплового насоса. Такие проекты наиболее популярны в Центральной Европе, что связано с недостатком площадей. Несмотря на большие капитальные затраты, вариант с температурой антифриза раной -2°C имеет меньшие эксплуатационные затраты, что связано с меньшим типоразмером теплового насоса. Большее количество труб требует значительных площадей для их размещения. Такие проекты наиболее популярны в США и Канаде.

Сказать о том, какой вариант имеет безоговорочные преимущества, не представляется возможным. Отклонения между затратами вполне укладываются в рамки точности проведения вычислительного эксперимента.

Выводы

1. В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на работу горизонтальных грунтовых теплообменников: теплопроводность грунта, взаимодействие труб в траншее и траншей между собой, температура антифриза в контуре теплообменников.
2. Представлены основные положения методики проектирования теплонасосных систем с горизонтальными грунтовыми теплообменниками. Методика составлена на основе компьютерных экспериментов, выполненных с помощью программы МОДЭН (версия 2.1).
3. Приведен пример подбора теплонасосной установки с применением полученных результатов.

Сводная таблица результатов расчета к примеру

Параметры	Размер мер- ность	1 труба в траншее			2 трубы в траншее			4 трубы в траншее		
		Температура антифриза			Температура антифриза			Температура антифриза		
		-10	-6	-2	-10	-6	-2	-10	-6	-2
Общая мощность котельной	кВт	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Требуемая теплопроизводительность теплового насоса	кВт	63.30	63.30	63.30	63.30	63.30	63.30	63.30	63.30	63.30
Мощность пиковых электродкотлов	кВт	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7
СОР		2.35	2.65	2.90	2.35	2.65	2.90	2.35	2.65	2.90
Мощность грунтового теплообменника	кВт	36.36	39.41	41.47	36.36	39.41	36.36	39.41	41.47	41.47
Отобранная теплота на 100 м траншеи	кВт	1.73	1.20	0.65	2.39	1.66	0.90	3.52	2.44	1.32
Длина траншей	м	2097.74	3274.88	6355.93	1520.86	2374.29	4608.05	1033.14	1612.88	3130.29
Длина труб	м	2097.74	3274.88	6355.93	3041.73	4748.58	9216.09	4132.55	6451.52	12521.17
Марка теплонасоса		350z	300z	250z	350z	300z	250z	350z	300z	250z
Паспортная мощность ТН		125.00	107.00	90.00	125.00	107.00	90.00	125.00	107.00	90.00
N	кВт	26.94	23.89	21.83	26.94	23.89	21.83	26.94	23.89	21.83
Стоимость ТН	\$	18750.00	18190.00	17100.00	18750.00	18190.00	17100.00	18750.00	18190.00	17100.00
Стоимость труб	\$	1048.87	1637.44	3177.96	1520.86	2374.29	4608.05	2066.28	3225.76	6260.59
Стоимость траншей	\$	559.4	873.3	1637.44	608.35	949.72	1843.22	619.88	967.73	1878.18
Стоимость пикового котла	\$	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Прочие кап. затраты	\$	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
Итого капитальных затрат	\$	29858	30200	3147.3	30379	31014	33051	31879	31014	33051
Экономия электрической энергии	кВт*час	0	14149	23703	0	14149	23703	0	14149	23703

Условные обозначения

СОР - коэффициент трансформации теплового насоса,
С_{гр} – теплоемкость грунта, Дж/(м³*°С),
Днар – наружный диаметр трубопровода грунтового теплообменника, м,
Кзагр - коэффициент загрузки теплового насоса,
Ктран – коэффициент, учитывающий расстояние между траншеями,
Ктр – коэффициент, учитывающий число труб в траншее,
Лтран – длина траншеи для размещения горизонтального грунтового теплообменника, м,
Лтр – длина трубопроводов горизонтального грунтового теплообменника, м,
Н – электрическая мощность привода теплового насоса, Вт,
Тгр – температура грунта, °С,
Тж – средняя температура антифриза (теплоносителя, проходящего через испаритель), °С,
Q_{год} - суммарный годовой расход тепловой энергии, Дж,
Q_{max} - максимальная тепловая нагрузка, Вт,
Q_h – теплопроизводительность теплового насоса, Вт,
Q_c – холодопроизводительность теплового насоса, Вт,
Q_{тн} – требуемая теплопроизводительность теплового насоса, Вт,
Q_{гт} – тепловая мощность грунтового теплообменника, Вт,
τ_{max} - число часов использования максимума тепловой нагрузки, с (час),
τ_{год} - продолжительность года,
λ -теплопроводность, Вт/(м*°С),
λ_{th} -теплопроводность талого грунта, Вт/(м*°С),
λ_f -теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м*°С),
λ_{ст} – теплопроводность стенки трубы, Вт/(м*°С).

Литература

1. Sanner B. DESCRIPTION OF GROUND SOURCE TYPES FOR THE HEAT PUMP. - www.geothermie.de/ueb_seiten/ub_sanner.htm
2. Sanner B. Ground Heat Sources for Heat Pumps (classification, characteristics, advantages) - www.geothermie.de/ueb_seiten/ub_sanner.htm
3. ASHRAE Handbook. 1999 HVAC Application. Chapter 31. Energy resources.
4. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты вечномёрзлых грунтов.
5. Commercial Earth Energy Systems: a Buyers Guide. - Her Majesty the Queen in Right of Canada, 2002
6. Closed Loop Ground-Coupled Heat Pumps - HPC-IFS2, January 2002
7. Волов Г.Я., Кочепасов К.Л. Использование тепловых насосов в теплоснабжении и горячем водоснабжении. – Энергия и менеджмент, 2002, NN2 и 3.
8. Волов Г.Я. Внедрение имитационного моделирования в инженерную практику (программа МОДЭН, версия 2,0) – Энергия и менеджмент, 2001, NN2, с. 30-33.