

УДК. 621.577

**П.Ф. Стоянов**

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039, Украина

## АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК

*Статья посвящена анализу характеристик тепловых насосов, работающих с разными источниками низкопотенциального тепла. Определены факторы, которые влияют на энергетическую эффективность, оценены особенности работы грунтовых и воздушных тепловых насосов для климатических условий города Одесса. Рассмотрены особенности проектирования тепловых насосов.*

**Ключевые слова:** Тепловой насос – Низкопотенциальное тепло – Температура – Тепловой поток – Эффективность

**П.Ф. Стоянов**

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

## АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК

*Статья посвящена анализу характеристик тепловых насосов, работающих с разными джерелами низкопотенційного тепла. Визначено фактори, які впливають на енергетичну ефективність, оцінені особливості роботи ґрунтових та повітряних теплових насосів для кліматичних умов міста Одеса. Розглянуті особливості проектування теплових насосів.*

**Ключові слова:** Тепловий насос – Низькопотенційне тепло – Температура – Тепловий потік – Ефективність

DOI: 10.15673/0453-8307.2/2015.39292



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## I. ВВЕДЕНИЕ

Истощение запасов ископаемых энергоносителей, а также возрастающие темпы их потребления повышают актуальность применения тепловых насосов. Потенциал бросового тепла, а, следовательно, использования тепловых насосов, колоссальный. Принцип действия теплового насоса впервые был изложен в диссертации Сади Карно в 1824 г., а практическое схемное решение в свою очередь было уже предложено Вильямом Томпсоном (впоследствии - лорд Кельвин) в 1852 г. Впоследствии в 1912 г. в Швейцарии был выдан патент на технологию тепловых насосов. Широкое распространение использования тепловых насосов в различных сферах промышленности позволяет на сегодняшний день решать многочисленные задачи, такие как, горячее водоснабжение, отопление объектов, использование в различных технологических процессах. Мировой энергетический комитет прогнозирует, что в развитых странах к 2020 году тепловые насосы будут обеспечивать порядка 75% потребностей отопления и горячего водоснабжения. Одним из основных показателей устойчивого развития государства является степень автономности его энергетического комплекса. Учитывая, что для Украины характерен значи-

тельный импорт углеводородов, идея повсеместного внедрения повышающих термотрансформаторов звучит более чем актуально. Применение тепловых насосов позволяет решить как энергетические вопросы, так и улучшить экологическое состояние окружающей среды. Характерной отличительной особенностью тепловых насосов от электрических, газовых либо дизельных генераторов тепловой энергии является то, что в процессе производства тепла до 80% энергии извлекается из окружающей среды либо источников бросовой теплоты.

За последние годы в Украине отмечается существенное повышение динамики внедрения тепловых насосов в жилищно-коммунальном секторе. Однако, потенциал тепловых насосов еще достаточно мало практически применяется на крупных промышленных предприятиях. Это связано, прежде всего, с достаточно большими первоначальными капиталовложениями, а также низкими тарифами на энергоносители, по сравнению, например, со странами Европейского союза.

Украина потребляет огромное количество энергии на отопление, поэтому рассмотрение опыта широкого внедрения тепловых насосов странами Северной Европы звучит более чем актуально. В случае широкого внедрения тепловых насосов

также значительно сокращаются выбросы в атмосферу  $\text{CO}_2$ , канцерогенных соединений образующихся при сгорании полезных ископаемых. Целью данной работы является анализ тепловых насосов, доступных источников низкопотенциальной энергии и факторов, оказывающих существенное влияние на их энергетические показатели.

## II. ОЦЕНКА ИСТОЧНИКОВ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА

В качестве низкопотенциального источника тепла (НПИТ) возможно использование: вытяжного воздуха, наружного воздуха, грунта, сточных вод, подземных вод, поверхностных вод (озера,

моря) и т.д. Оптимальный вариант источника НПИТ определяется в ходе анализа градостроительных условий расположения проектируемых объектов, архитектурно-планировочных решений и конструктивных параметров.

В таблице 1 приведена характеристика основных НПИТ для тепловых насосов. Из приведенного перечня источников тепла выгодно отличается наружный воздух, который, во-первых, является общедоступным и совершенно бесплатным, а, во-вторых, обладает достаточно широким температурным диапазоном использования. При этом срок окупаемости воздушных тепловых насосов намного меньше геотермального теплонасосного оборудования.

**Таблица 1** - Характеристики основных источников низкопотенциального тепла для тепловых насосов в режиме отопления

Источник тепла	Располагаемый тепловой потенциал	Температурный диапазон, °С	Способ отбора низкопотенциальной энергии
Наружный воздух	Неограниченный	-10/+15	Непосредственно в испарителях тепловых насосов либо с промежуточным теплоносителем
Отводимый использованный воздух	Ограниченный	15/25	/...../
Подпочвенная вода	Ограниченный	4/10	/...../
Озерная вода	Ограниченный	0/10	/...../
Речная вода	Ограниченный	0/10	/...../
Морская вода	Ограниченный	3/8	/...../
Грунт	Неограниченный	0/10	С промежуточным теплоносителем в контуре испарителей
Грунтовые воды	Ограниченный	>10	Непосредственно в испарителях тепловых насосов либо с промежуточным теплоносителем
Геотермальная вода	Ограниченный	20/50	/...../

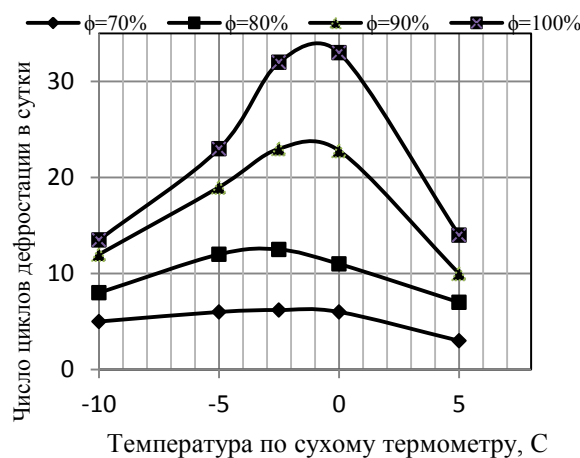
Наружный воздух как источник тепла обладает также рядом недостатков, таких как:

- быстрое падение коэффициента термотрансформации при снижении температуры наружного воздуха;

- повышение разности температур конденсации и кипения в период минимальных температур в зимний период, что приводит к снижению термодинамической эффективности установки;

- необходимость проведения процедуры дефростации испарителя при образовании на его поверхности "ледяной шубы".

Обледенение в определенной степени поверхности испарителя теплового насоса допустимо. Однако, в условиях повышенной влажности воздуха и его температуры ниже  $0^\circ\text{C}$  количество необходимых циклов дефростации поверхности многократно возрастает. Зависимость частоты дефростации от относительной влажности  $\phi$  и температуры сухого термометра  $t_c$  приведена на рисунке 1 [1].



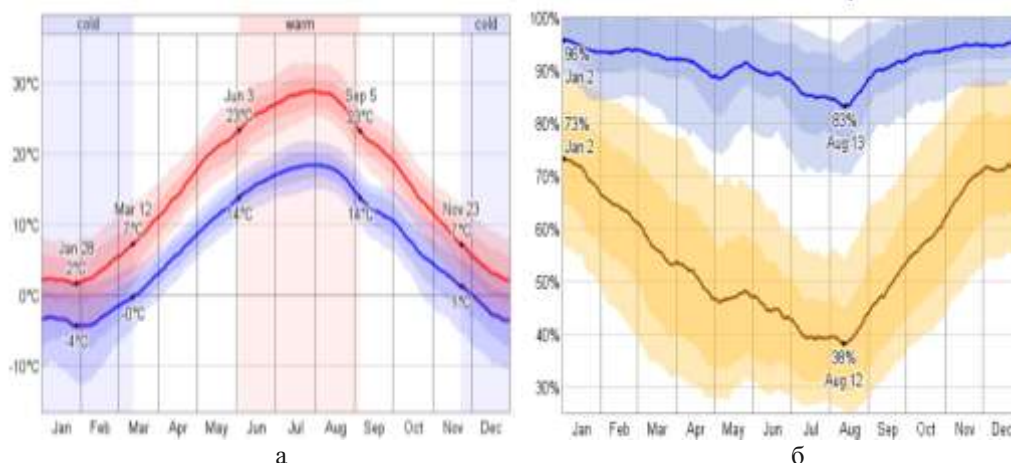
**Рисунок 1** – Зависимость частоты дефростации от относительной влажности  $\phi$  и температуры сухого термометра

Максимальная частота циклов дефростации поверхности испарителя теплового насоса наблюдается в диапазоне температур  $-5 \pm 0$  °С. Это связано со значительным осаждением влаги из наружного воздуха в процессе его прохождения через теплообменную поверхность испарителя термотрансформатора.

Осажденная влага из воздуха постепенно накапливается на теплообменной поверхности испарителя в виде обледенения, ухудшая при этом условия теплообмена между воздухом и холодильным агентом. В условиях высокой влажности и низкой температуры наружного воздуха эксплу-

атация воздушного теплового насоса становится неэффективна.

В открытом доступе имеются достаточно обширные метеорологические данные [5]. Проанализируем возможности применения воздушных и геотермальных тепловых насосов в г. Одесса на основании данных метеорологической станции, расположенной в Одесском международном аэропорту за период с 1989 по 2012 годы. График изменения среднесуточной температуры по сухому термометру и относительной влажности воздуха в течение года представлен на рисунке 2.



**Рисунок 2** – График изменения среднесуточной температуры и влажности в г. Одесса в течение года:  
а – наиболее высокой и низкой среднесуточной температуры воздуха  
б – наиболее высокой и низкой относительной влажности воздуха

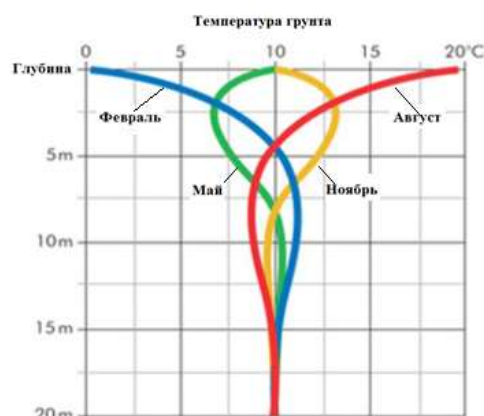
Исходя из рисунка 2 можно сделать вывод, что для Одессы характерен влажный климат и при этом среднесуточная минимальная температура воздуха практически не опускается ниже  $-4$  °С. Это позволяет применять воздушные тепловые достаточно продолжительно в период отопительного сезона при сохранении высокой энергетической эффективности термотрансформаторов.

Довольно часто тепловые насосы в качестве источника тепла используют отводимый из помещения теплый вентиляционный воздух. В этом случае для работы термотрансформатора в режиме отопления помещений либо, например, нагрева воды необходимо, чтобы вентиляция помещений проводилась соответственно тоже постоянно.

Постоянным источником возобновляемой энергии для теплового насоса является грунт. При проектировании геотермальных тепловых насосов возможно использование вертикальных и горизонтальных грунтовых теплообменников. Распространено мнение, что температура грунта в течение года незначительно изменяется. На рисунке 3 представлен характер изменения температуры грунта в зависимости от глубины и месяца года.

По данным Одесской геофизической обсерватории изменение температуры грунта на различной глубине представлено на рисунке 4 [6].

Анализ рисунка 4 позволяет сделать вывод, что температура грунта на глубине порядка 4 м постоянна в течение года.



**Рисунок 3** Характер изменения температуры грунта по глубине в зависимости от месяца года

Для условий г. Брюссель в литературе [2] имеются экспериментальные данные, исходя из которых изменения температуры в грунте на про-

тяжении года довольно существенны, и даже на глубине 1 м зимой температура приближается к 0 °С (рисунок 5). Характер изменения изотерм по глубине грунта на рисунках 4 и 5 хорошо согласуется. Это позволяет распространять закономерность, изображенную на рисунке 5, на грунты Причерноморского региона Украины. Исследования показывают, что температура грунта по глубине зависит главным образом от типа грунта (песок, глина, гравий и т.д.) и его влажности. Все эти особенности необходимо учитывать в стадии проектирования геотермального теплового насоса.

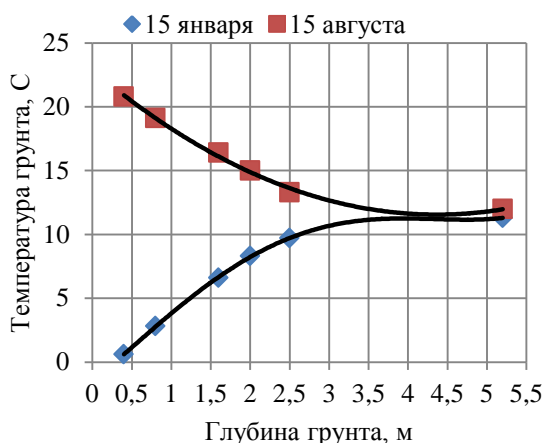


Рисунок 4 – Изменение температуры в грунте по глубине (г. Одесса)

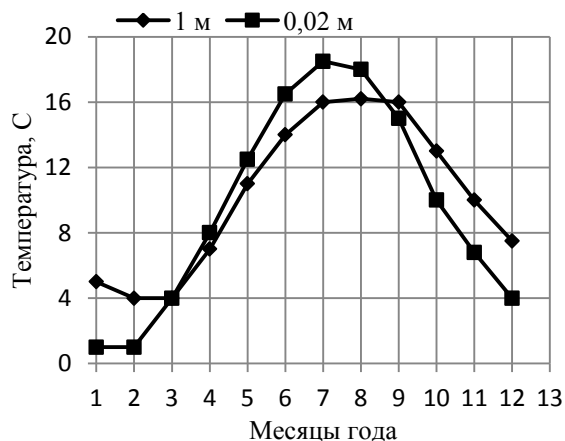


Рисунок 5 – Изменение температуры в грунте в течение года (г. Брюссель)

Контур горизонтального грунтового коллектора теплового насоса на практике располагается на глубине 1,2-1,5 м [4]. Глубина закладки горизонтальных коллекторов лежит в пределах существенного изменения температуры грунта в течение года (рисунок 3), поэтому следует учитывать существенное изменение производительности геотермального теплового насоса. Более глубокая закладка в грунт коллекторов приводит к неоправданному повышению строительных расходов и используется для регионов с более холодным и

продолжительным зимним периодом. Для эффективной регенерации грунта участки земли, под которыми проложены горизонтальные коллектора теплового насоса должны быть минимально застроены и хорошо освещены. Таким образом обеспечивается подготовка грунта к началу отопительного сезона и эффективная работа термотрансформатора. Теплосъем грунтовых горизонтальных теплообменников зависит от типа грунта, его влагосодержания и климатической зоны, в которой располагается объект. Теплоотдача различных грунтов представлена в таблице 2 [4].

Таблица 2 – Теплоотдача различных грунтов

Тип грунта	Удельный тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>
Сухой песчаный грунт	10-15
Сырой песчаный грунт	15-20
Сухая глинистая почва	20-25
Сырая глинистая почва	25-30
Насыщенная грунтовыми водами почва	30-35

Основным недостатком при использовании горизонтальных грунтовых коллекторов является масштаб необходимых земляных работ. Использование вертикальных тепловых зондов по сравнению с горизонтальными коллекторами позволяет уменьшить требуемую поверхность грунта для геотермального теплового насоса в 10-20 раз [1]. При прокладке коллекторов также следует учитывать тот фактор, что возможна ситуация частичного обмерзания трубок грунтового теплообменника, что не оказывает существенного влияния на регенерацию грунта. Однако, пагубно действует на корневые системы растений и деревьев.

Вертикальные грунтовые тепловые зонды термотрансформаторов устанавливаются путем бурения скважин на глубину порядка 50-200 м. В зависимости от типа грунтов удельный тепловой поток существенно изменяется. В таблице 3 приведены значения удельного теплового потока для вертикальных грунтовых тепловых зондов в зависимости от типа грунта [3]. Рекомендуется располагать горизонтальные зонды на расстоянии друг от друга не менее 5-6 м.

Таблица 3 – Зависимость удельного теплового потока для вертикальных грунтовых тепловых зондов в зависимости от типа грунта

Тип грунта	Удельный тепловой поток, Вт/м
Сухой песчаный грунт	20
Сырой песчаный грунт	40
Влажный каменистый грунт	60
Водоносные слои грунта (содержащие гравий)	80-100



Вода как источник низкопотенциального тепла для теплового насоса весьма интересна и кажется практически идеальным вариантом. При использовании воды из артезианских скважин, которые сами по себе достаточно затратные из-за бурения скважин и необходимости прокладки значительных трубопроводов, возникает проблема коррозии и выпадения минеральных отложений на поверхности теплообменников. Открытые водоемы, такие как озера, моря и реки, могут служить хорошим источником низкопотенциального тепла. Однако, для них необходимо принимать во внимание изменчивость объемов, чистоты и температурных режимов водных ресурсов. Экологические аспекты в этом случае также должны быть учтены.

Весьма перспективным является вариант использования теплового потенциала сточных вод. Данный источник мало используется на данный момент, что связано, прежде всего, с биологической и коррозионной агрессивностью и неравномерным поступлением стоков в канализационные сети. Поступление сбросного тепла происходит с запаздыванием по отношению ко времени потребления тепла. Согласование этих величин проводится введением в схемное решение тепловых насосов баков аккумуляторов, которые сглаживают пиковые нагрузки в потреблении, например, горячей воды. На рисунке 6 представлено техническое решение по установке устройств для отбора теплоты сточных вод в канализационном коллекторе.



*Рисунок 6 – Техническое решение по установке устройств для отбора теплоты сточных вод в канализационном коллекторе*

В последние годы в технике наблюдается повышение интереса, наряду с парокомпрессионными тепловыми насосами (ПКТН), к абсорбционным тепловым насосам (АБТН). Термотрансформаторы абсорбционного типа представлены водоаммиачными и солевыми (водные растворы солей хлористого или бромистого лития) холодильными машинами. По причине высокого давления аммиака и небольшой энергетической эффективности водоаммиачные абсорбционные термотрансформаторы не получили широкого распространения в отличие от бромистолитиевых тепловых насосов. Абсорбционные бромистолитиевые насосы позволяют при условии наличия сбросного теплового потока с температурой на уровне 40-60 °С и охлаждающей среды (вода с температурой 15-20 °С, воздух с температурой не выше 10 °С) повысить температуру нагреваемого теплоносителя на 15-30 °С выше температуры греющего источника на входе в абсорбционный тепловой насос [3]. Источники сбросного тепла с температурными уровнями, указанными выше, довольно распространены и весьма масштабны по суммарному количеству энергии (химическая промышленность, горячие выхлопные газы, дымовые газы ТЭЦ и т.д.).

Существенными недостатками АБТН по сравнению с ПКТН являются более низкий энергетический коэффициент и достаточно большие мас-

согabarитные показатели. Схемные решения при увеличении энергоэффективности АБТН существенно усложняются.

Решение о целесообразности выбора того или иного источника низкопотенциальной теплоты, схемного решения для теплового насоса проводится на основании технико-экономического обоснования для каждого конкретного случая.

### III. ВЫВОДЫ

В работе проведен сравнительный анализ источников низкопотенциальной энергии для тепловых насосов, определены факторы, оказывающее наибольшее влияние на энергетическую эффективность системы. Проанализирован температурный уровень работы грунтового и воздушного теплообменников повышающего термотрансформатора при условии его эксплуатации в г. Одесса. Выявлено, что стандартная глубина закладки горизонтальных коллекторов геотермального теплового насоса не оптимальна с точки зрения поддержания стационарного температурного поля в толще грунта в течение года. Этот фактор оказывает существенное влияние на работу термотрансформатора.

В открытых источниках содержатся ограниченные корректные экспериментальные данные

относительно долговременной эксплуатации геотермальных тепловых насосов, надежности данных систем при условии их длительной эксплуатации, эффективного периода регенерации тепла грунта вокруг грунтового теплообменника. Анализ литературы показал, что установка определенного типа теплового насоса (геотермального, воздушного, водяного, абсорбционного) зависит прежде всего от климатических условий местности, технических возможностей реализации проекта, доступности и характеристик источника низкопотенциальной теплоты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рей Д., Макмайкл Д. Тепловые насосы: пер. с англ. / Д. Рей, Д. Макмайкл // М.: Энергоиздат. – 1982. – 224 с., ил.

2. **Godard O. and Poppe H.** Temperatures in the soil in Belgium and in Luxembourg. *Bulletin of the Belgian Society of Astronomy, Meteorology and Earth Sciences*, Vol.76, No.9-10, Sept/Oct. 1963 (in French).

3. **Горшков В.Г.** Тепловые насосы. Аналитический обзор / **В.Г. Горшков** // Справочник промышленного оборудования. – 2004. – №2 – С. 47-80

4. Руководство по проектированию. Тепловые насосы. Viessmann Werke GmbH & Co, 2011, 125 с.

5. WeatherSpark [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.weatherspark.com, дата обращения: 15.01.2015.

6. **Мартыновский В.С.** Тепловые насосы. /**В.С. Мартыновский** // М.-Л.: Государственное энергетическое издательство. – 1955. – 191 с.

*P.F. Stoianov*

Odessa national academy of food technologies, 112 Kanatnaja str., Odessa, 65039, Ukraine

#### HEAT PUMP INSTALLATIONS CHARACTERISTICS ANALYSIS

*Heat pump installation are very efficient heating and cooling systems and can significantly reduce your energy costs. The technical and economic performance of a heat pump is closely related to the characteristics of the heat source. This paper presents an overview of different heat sources for heat pumps, recommendation for designing this systems. The heat source temperature and its constancy during a year depend very strongly on the type of heat source. The heat pump performance were analyzed using ground and air temperatures for Odessa. The results of research indicate of natural temperature distribution in ground. Areas of natural temperature distribution in ground demonstrate short and long-term fluctuations of temperatures. Short-term fluctuations are influenced by weather and they exist only up to 1 m below ground surface. Long-term fluctuations (known also as seasonal fluctuations) occur in the second area (up to 8 or 20 m depending on the ground type). In deep area for every particular ground type temperature stays constant and very slowly increases with depth according to geothermal gradient, which indicates thermal impact of Earth's inner core.*

**Keywords:** Heat pump – Low-grade heat - Temperature - Heat flow - Effectiveness

#### REFERENCES

1. **Rey D., Makmail D. 1982.** Teplovye nasosy: Per. s angl. M.:Energoizdat,. 224 p.

2. **Godard O., Poppe H. 1963.** Temperatures in the soil in Belgium and in Luxembourg. *Bulletin of the Belgian Society of Astronomy, Meteorology and Earth Sciences*, Vol.76, No.9-10. (In French).

3. **Gorshkov V.G. 2004.** Teplovye nasosy. Analitich

eskiy obzor/ *Spravochnik promyshlennogo oborudovaniya*, No.2, 7-80.

4. Rukovodstvo po proectirovaniyu. Teplovye nasosy. Viessmann Werke GmbH & Co, 2011, 125 s.

5. WeatherSpark [Electronic resource]. Access mode: www.weatherspark.com, date of access 15 jan. 2015.

6. **Martunovskiy V.S. 1955.** Heat Pumps. M.-L: Gosenergoizdat, 191 p.

Отримана в редакції 03.02.2015, прийнята до друку 03.03.2015