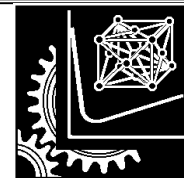


ТЕРМОДИНАМИКА



УДК 621.431

DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).117-122](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).117-122)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Р.А.Усенков, С.Я.Коханова, С.М.Авраменко, В.Е.Иванов

USING A HEAT PUMP TO ENSURE THE OPERATION OF THE HEATING AND HOT WATER SUPPLY SYSTEM

R.A.Usenkov, S.Ya.Kokhanova, S.M.Avramenko, V.E.Ivanov

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, RAUsenkov@kai.ru

В статье приведен обзор существующих конструкций тепловых насосов. Рассматриваются процессы передачи теплоты от горячего тела к холодному и обратные процессы, осуществляемые с помощью тепловых насосов. Показано, что тепловые насосы можно использовать как для подготовки горячей воды с заданными параметрами для систем отопления и горячего водоснабжения, так и для получения холода. Рассмотрена работа парового компрессионного теплового насоса и энергетической установки ТНУ-3 для охлаждения молока с одновременным нагревом воды на молочных фермах. Также приведена схема теплонасосной установки ТХУ-14. Для представленных теплонасосных установок был выполнен расчет отопительного коэффициента. Также произведен оценочный расчет коэффициентов преобразования.

Ключевые слова: *теплота, температура, окружающая среда, термодинамический цикл, процесс, тепловой насос, эффективность цикла, преобразование, теплопроводность, холодильник*

Для цитирования: *Усенков Р.А., Коханова С.Я., Авраменко С.М., Иванов В.Е. Использование теплового насоса для обеспечения работы систем отопления и горячего водоснабжения // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №4(125). С. 117-122. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).117-122](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).117-122)*

The article provides an overview of existing heat pump designs. The processes of heat transfer from a hot body to a cold one and reverse processes carried out using heat pumps are considered. It is shown that heat pumps can be used both for preparing hot water with given parameters for heating systems and hot water supply systems, and for obtaining cold. The work of a steam compression heat pump and an HPU-3 power plant for cooling milk with simultaneous heating of water at dairy farms has been considered. Also, a diagram is shown for the THU-14 heat pump unit. The heating coefficient was calculated for the presented heat pump units. An assessment of the conversion factors has also been carried out.

Keywords: *heat, temperature, environment, thermodynamic cycle, process, heat pump, cycle efficiency, transformation, thermal conductivity, refrigerator*

For citation: *Usenkov R.A., Kokhanova S.Ya., Avramenko S.M., Ivanov V.E. Using a heat pump to ensure the operation of the heating and hot water supply system // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №4(125). P.117-122. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).117-122](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).117-122)*

Введение

Известно, что в основе работы всех холодильных машин и тепловых насосов лежит обратный термодинамический цикл. В результате совершения замкнутого обратного термодинамического цикла рабочее тело возвращается в начальное состояние.

Характерной особенностью обратного термодинамического цикла является то, что за счет затраты механической энергии теплота будет передаваться от холодного тела к нагретому. Таким образом, реализация обратного термодинамического цикла позволяет получать не только низкие температуры в испарителе холодильной установки, но и высокие температуры, которые необходимы для эффективной работы систем отопления и горячего

водоснабжения, в конденсаторе с помощью теплового насоса.

Таким образом, в холодильной установке происходит отвод теплоты из ограниченного объема к окружающей среде (воздух, вода), а в тепловом насосе теплота окружающей среды передается к нагреваемой среде. Источниками низкой температуры (т.е. окружающей средой) могут быть окружающий воздух, отработавший воздух, почва или грунт, глубинная теплота земли, а также поверхностные, грунтовые или сточные воды.

В качестве источника низкой температуры для тепловых насосов можно использовать теплоту, отводимую от охлаждаемых тел в холодильных установках. Эта теплота может обеспечивать потребности предприятия, работа которого связана с применением

холодильных машин (мясокомбинаты, молокозаводы).

При необходимости дополнительный нагрев воды до заданной температуры, необходимой для нужд отопления и горячего водоснабжения, может быть осуществлен электронагревателями.

Тепловые насосы можно эксплуатировать как летом для выработки холода, так и зимой для получения тепловой энергии.

Целью представленной работы является анализ существующих конструкций тепловых насосов, которые можно использовать для отопления и горячего водоснабжения жилых домов и производственных помещений. Данная тематика научных исследований приобрела свою актуальность в связи с развитием новых технологий и появлением новых материалов.

Методы

Принцип действия теплового насоса известен уже более 100 лет. Впервые в Европе мощный тепловой насос для отопления зданий был применен в в Цюрихе (Швейцария) в 1938 г. [1].

Тепловой насос осуществляет передачу внутренней энергии от теплоносителя с низкой температурой к теплоносителю с более высокой температурой. Поскольку в соответствии со вторым законом термодинамики тепловая энергия без каких-либо внешних воздействий может переходить только с высокотемпературного уровня на более низкий, то для осуществления теплонасосного цикла необходимо затратить внешнюю работу, и процесс передачи энергии в направлении, противоположном естественному температурному напору, осуществляется в обратном цикле. Цикл теплового насоса в принципе не отличается от цикла холодильных машин. Если для холодильных установок теплоприемник – это окружающая среда, то для теплового насоса она является уже источником теплоты.

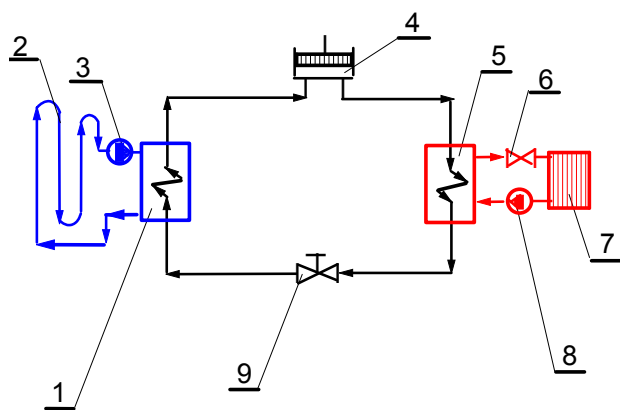


Рис.1. Принципиальная схема компрессионного теплового насоса [2]

На рис.1 приведена схема парового компрессионного теплового насоса [2]. Принцип работы представленного теплового насоса заключается в следующем: установка состоит из испарителя 1, поли-

этиленовых труб 2, центробежного насоса для принудительной циркуляции антифриза 3, компрессора 4, конденсатора 5, вентиля 6, отопительного прибора 7, центробежного насоса для принудительной циркуляции воды 8 в системе отопления и дроссельного вентиля 9. Пары хладагента (фреон R22), испарившегося в испарителе 1 за счет теплоты источника низкой температуры (тепловая энергия верхнего слоя земли), всасываются компрессором 4 и сжимаются до давления 2,2 МПа. При сжатии температура паров хладагента повышается до температуры 70–100°C, и далее рабочее тело поступает в конденсатор 5, где оно конденсируется. Процесс конденсации хладагента сопровождается выделением в конденсаторе тепловой энергии, которую и становится возможным передать отопительным приборам 7 системы отопления с помощью теплоносителя (воды), принудительно циркулирующего в замкнутом контуре. При этом температура воды, циркулирующей в системе отопления, будет равна 65–70°C. Далее охлажденный хладагент с температурой 55°C поступает в дроссельный клапан 9, где будет происходить процесс дросселирования, и после этого рабочее тело вновь поступит в испаритель 1. После этого процессы, происходящие в тепловом насосе, повторятся.

Также источником теплоты низкой температуры для теплового насоса могут служить теплота охлаждающей воды конденсаторов паровых турбин или компрессоров, выпускные газы двигателей внутреннего сгорания либо воздух, удаляемый из помещений предприятий.

В качестве источника низкой температуры для тепловых насосов можно использовать теплоту, отводимую от охлаждаемых тел в холодильных установках. Эта теплота может обеспечивать потребности предприятия, работа которого связана с применением холодильных машин (мясокомбинаты, молокозаводы).

Весьма существенную (до 50%) долю расхода энергии на молокозаводах составляют затраты электроэнергии на привод компрессоров холодильных установок, а также расходы теплоты на подогрев воды в системах горячего водоснабжения. В то же время из конденсаторов холодильных установок в атмосферу выбрасывается большое количество теплоты, которая может обеспечивать горячее водоснабжение коровника, если холодильную установку приспособить для регенерации теплоты.

Чтобы обеспечить сохранение качества молока на фермах, его охлаждают от 37°C до 4°C, и для этого молочные фермы оснащают холодильными установками. Использование «высвобожденной» теплоты молока для горячего водоснабжения — это дополнительный способ для энергосбережения на сельскохозяйственных предприятиях.

Согласно теоретическим расчетам, горячей водой можно обеспечить при удое от каждой коровы около 5000 л/год, коровник на 30–40 голов и жилой дом на 4–6 человек [3].

В работе [4] описана работа энергетической установки ТНУ-3 для охлаждения молока с одновременным нагревом воды (рис. 2).

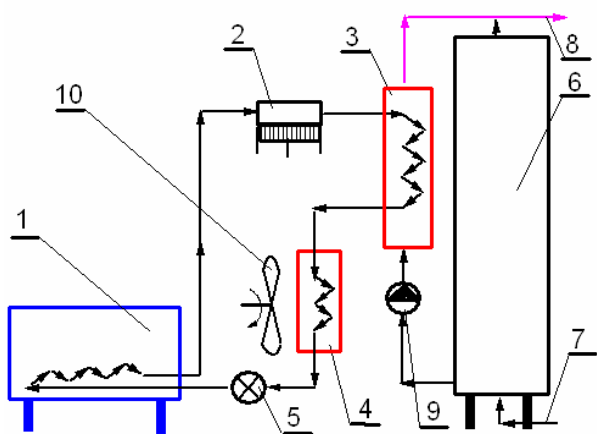


Рис.2. Схема работы холодильной установки в качестве тепловой насосной установки ТНУ-3 [4]

Принцип работы тепловой насосной установки ТНУ-3 заключается в следующем: установка состоит из испарителя в молочном резервуаре 1, компрессора 2, конденсатора для подогрева воды 3, воздушного конденсатора 4, дросселя 5, водяного бака 6, входа холодной воды 7, выхода горячей воды 8, центробежного насоса для принудительной циркуляции воды 9 и вентилятора 10.

В качестве рабочего тела в холодильной установке используется фреон R12. Давление в конденсаторе 3 составляет 1,73 МПа, а температура равна +45°C. Давление в испарителе 1 составляет 0,34 МПа, а температура равна –3°C. В контуре хладагента имеется дополнительный теплообменник-конденсатор 4, позволяющий повысить температуру небольшой части горячей воды от 40°C до 60–70°C за счет теплоты перегрева хладагента в холодильном цикле. Суммарная мощность электроприводов составляет 35 кВт. Конденсатор 4 может быть размещен непосредственно в водяном баке-аккумуляторе теплоты 6.

Теплота, отводимая парным молоком при его охлаждении, и «отбросная» теплота компрессорной установки холодильной машины могут быть использованы с помощью теплового насоса.

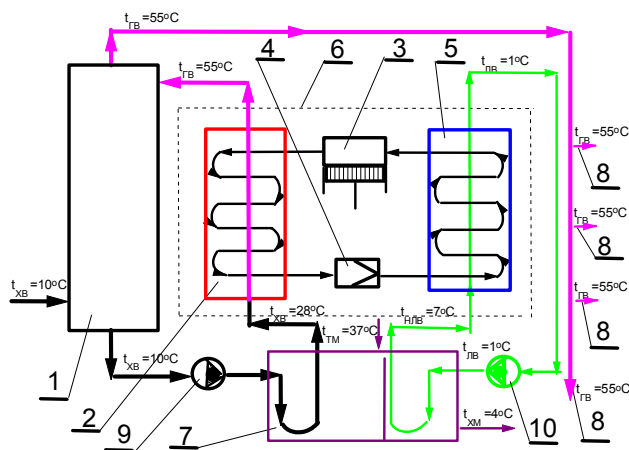


Рис. 3. Схема работы теплового насоса на молочной ферме для нагрева воды [5]

На рис.3 приведена схема работы теплового насоса на молочной ферме для нагрева воды [5]. Принцип работы представленного теплового насоса заключается в следующем: установка состоит из гидроаккумулятора 1, конденсатора 2, компрессора 3, редукционного клапана 4, резервуара с «ледяной» водой 5, теплового насоса 6, пластинчатого теплообменника 7, потребителей теплой воды 8, центробежного насоса для принудительной циркуляции холодной воды 9 и центробежного насоса для принудительной циркуляции «ледяной» воды 10.

Свежесняженное молоко с начальной температурой 37°C поступает в пластинчатый теплообменник 7. В первую секцию теплообменника вмонтирован трубопровод, по которому подается водопроводная вода с температурой 10°C , движущаяся в направлении обратном потоку молока (противоток). При этом температура воды повышается до 28°C , а температура молока падает примерно до 20°C . Затем вода по трубопроводу поступает в теплообменник теплового насоса 2, сблокированного с конденсатором холодильной установки, где пары хладагента (фреон R22), конденсируясь, нагревают ее до 55°C . Теплая вода поступает в верхнюю половину аккумулятора 1, из которого по мере необходимости расходуется на хозяйственные нужды (для душевых установок).

Молоко из первой секции теплообменника 7 с температурой около 20°C поступает во вторую секцию, куда от холодильной установки по встроенному трубопроводу подается противотоком «ледяная» вода с температурой 1°C. Охлажденное до 4°C молоко нагнетается насосом в транспортные средства или в емкость для хранения.

Вода, нагретая до 7°C , поступает в резервуар с «ледяной» водой холодильной установки, где проходящий через испаритель кипящий хладагент отбирает у нее теплоту, снижая температуру до 1°C .

Таким образом, путем рекуперации «отбросной» теплоты молока и компрессорной установки холодильной машины без дополнительных энергетических затрат получают воду для хозяйственных целей с температурой 55°C в количестве 1,1 л на каждый литр охлаждаемого молока.

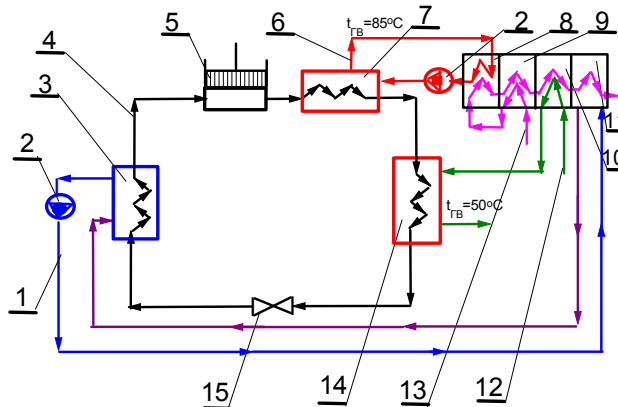


Рис. 4. Схема теплохолодильной установки типа ТХУ-14 для молочной фермы [6]

На рис.4 приведена схема теплонасосной установки ТХУ-14 для молочной фермы [6].

Принцип работы представленной теплохолодильной установки заключается в следующем: установка состоит из линии «ледяной» воды 1, центробежных насосов 2, испарителя 3, линии хладагента 4, компрессора 5, линии горячей воды 6, теплообменника 7, секции пастеризации 8, секции регенерации 9, секции предварительного охлаждения 10, секции окончательного охлаждения 11, линии водопроводной воды 12, линии молока 13, конденсатора 14 и терморегулирующего вентиля TRV 15.

Установка ТХУ-14 предназначена для охлаждения воды, используемой в качестве промежуточного хладагителя в емкостях, и одновременного ее нагрева для санитарно-технологических нужд в животноводческих фермах.

Кипящий в испарителе 3 хладагент (фреон R22) отбирает теплоту от воды в линии 1, снижая ее температуру до 0°C . Затем пары хладагента сжимаются компрессором 5 и подаются в теплообменник 7, где конденсируются за счет теплообмена с водой, которая нагреваясь, поступает в секцию пастеризатора 8. В отличие от других теплонасосных установок в эту схему включен теплообменник 7, который обеспечивает нагрев воды до $85\text{--}90^{\circ}\text{C}$ для пастеризации молока и других нужд фермы. Окончательно всю теплоту, полученную хладагентом в компрессоре 5, воспринимает охлаждающая вода в конденсаторе 14, которая нагревается до 50°C и используется на ферме для санитарно-гигиенических целей.

Как показали теоретические расчеты, применение на молочной ферме на 1000 голов теплонасосной установки на 75 кВт позволяет сэкономить в год на ферме 100 тонн жидкого топлива и 350000 кВтч электроэнергии.

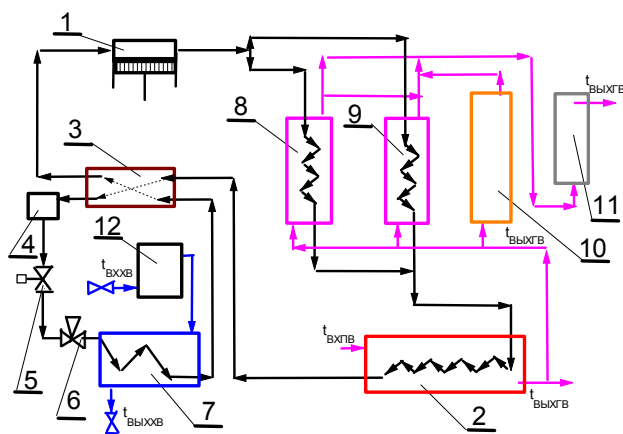


Рис.5. Технологическая схема теплохолодильной установки ТХУ-14 [6]

На рис.5 приведена технологическая схема теплохолодильной установки ТХУ-14 [6]. Принцип работы представленной теплохолодильной установки заключается в следующем: установка состоит из компрессора 1, конденсатора 2, регенеративного теплообменника 3, фильтра-осушителя 4, вентиля мембранного электромагнитного 5, терморегули-

рующего вентиля 6, испарителя 7, теплообменника 8, теплообменника 9, емкостного водонагревателя 10, электронагревателя 11 и емкости для холодной воды 12.

Пары хладагента (фреон R22) сжимаются компрессором 1 и подаются в конденсатор 2, где охлаждаются и конденсируются, отдавая теплоту проточной воде. Из конденсатора 2 жидкий хладагент поступает в регенеративный теплообменник 3, а затем в фильтр-осушитель 4, где осушается и очищается от примесей. Далее, проходя через вентиль с электромагнитным приводом 5, хладагент подается в терморегулирующий вентиль 6, где дросселируется до давления кипения, и поступает в испаритель 7. В испарителе 7 хладагент кипит, поглощая теплоту и охлаждая хладоноситель (вода). Пары фреона из испарителя 7 через регенеративный теплообменник 3 откачиваются компрессором 1, и далее цикл повторяется.

Холодная вода (хладоноситель) совершает замкнутый цикл в системе охлаждения молока.

Теплая вода на выходе из конденсатора 2 разделяется на два потока. Часть ее поступает в теплообменники 8, 9 и 10 для дальнейшего подогрева, причем ее количество задается водорегулирующим вентилем.

Вода в теплообменниках подогревается за счет теплообмена с горячими парами фреона, движущимися противотоком. Проточный теплообменник через 10–15 минут после включения холодильной машины обеспечивает нагрев воды до температуры 40°C . Теплообменник конвективного контура за цикл работы продолжительностью 3,25 часа нагревает воду в количестве 150 л до температуры 60°C .

При необходимости отбора горячей воды раньше окончания цикла теплового насоса включают электрический водонагреватель 11 и доводят температуру воды до заданного уровня.

Оригинальность и новизна результатов исследований

Проанализировав работу существующих конструкций тепловых насосов для отопления и горячего водоснабжения, можно заключить, что в качестве источника низкой температуры допустимо использовать геотермальную теплоту земли из небольших глубин. Экспериментально было установлено, что температура грунта на глубине 1–2 метра от поверхности земли в течение года меняется очень незначительно в пределах нескольких градусов.

Например, для Казани температуры почвы на глубине 1,6 м от поверхности земли варьируются в следующем диапазоне: низшая средняя месячная температура в отопительный период (зимой) $+1,6^{\circ}\text{C}$, высшая средняя месячная температура в летний период $+12,2^{\circ}\text{C}$. Средняя температура на глубине 1,6 м за год $+6,3^{\circ}\text{C}$.

Авторами предлагается конструкция теплонасосной установки, которая позволит отбирать теплоту из грунта на глубине 1,6 м для использования в дальнейшем для получения горячей воды.

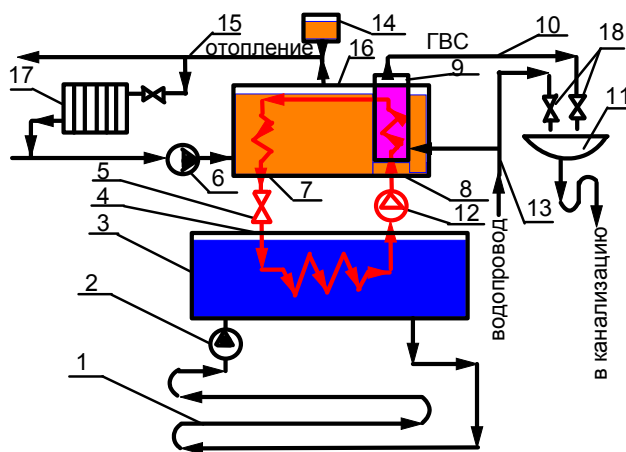


Рис.6. Схема установки с тепловым насосом для отопления и горячего водоснабжения: 1 — полиэтиленовые трубы ($d = 40$ мм; $l = 400$ м; глубина в земле 0,9-1,6 м); 2 — циркуляционный насос для подачи антифриза; 3 — сосуд с антифризом; 4 — испаритель; 5 — редукционный клапан; 6 — циркуляционный водяной насос для подачи воды в сосуд №2; 7 — конденсатор; 8 — конденсатор; 9 — сосуд №1 с водой с температурой 60°C для системы ГВС; 10 — трубопровод горячей воды; 11 — раковина; 12 — компрессор; 13 — водопровод холодной воды; 14 — расширительный бак системы отопления; 15 — трубопровод системы отопления; 16 — сосуд №2 с водой с температурой 50°C для системы отопления; 17 — отопительный прибор (секционный радиатор); 18 — смеситель системы холодного и горячего водоснабжения

На рис.6 приведена схема установки с тепловым насосом для отопления и горячего водоснабжения. Рабочее тело (антифриз) нагревается в почве до $+4^{\circ}\text{C}$ зимой и до $+8-10^{\circ}\text{C}$ летом. Пары хладагента теплового насоса (фреон-R22), образующиеся в испарителе 4, сжимаются компрессором 12 до давления 2,0 – 2,2 МПа и нагреваются до температуры $70-100^{\circ}\text{C}$. При прохождении через конденсатор 8 хладагент нагревает холодную воду в первом сосуде 9 до температуры 60°C , а сам охлаждается до $60-65^{\circ}\text{C}$. Конденсация паров фреона-R22 завершится в конденсаторе 7 при температуре 55°C согласно давлению хладагента после компрессора 12. В процессе конденсации хладагента вода во втором сосуде 16 нагреется до температуры 50°C и подается в отопительную систему, а затем вновь возвращается во второй сосуд с водой 16.

Общая мощность установки, представленной на рис.6, составляет 5,65 кВт, в том числе мощность циркуляционного насоса 2 для подачи антифриза — 0,5 кВт, мощность циркуляционного водяного насоса 6 для подачи воды во второй 16 системы отопления — 0,4 кВт.

Натурные исследования, проведенные на рабочем участке, показали, что удельная мощность грунта равна $10-15 \text{ кВт/м}^2$, т. е. в течение часа становится возможным получить $36-54 \text{ кДж}$ теплоты с площади поверхности грунта, равной 1 м^2 .

Результаты

Проведенный анализ работы энергетических установок показал, что использование теплового насоса вполне допустимо для обеспечения надежной и

безотказной работы систем отопления и горячего водоснабжения как в жилых зданиях, так и в производственных помещениях.

Обратный цикл, используемый для работы систем отопления и горячего водоснабжения, называется циклом теплового насоса. Эффективность работы цикла теплового насоса становится возможным оценить с помощью коэффициента преобразования или отопительного коэффициента:

$$\mu = \frac{T_2}{T_2 - T_1},$$

где T_1 — абсолютная температура источника тепла (грунта, воды, воздуха), К; T_2 — абсолютная температура воды, циркулирующей в отопительном контуре, К.

Для представленных энергетических установок был произведен расчет отопительного коэффициента, который позволил установить рабочую схему наиболее эффективного теплового насоса. Отопительный коэффициент энергетической установки, предложенный авторами статьи, получился равным 5,65.

Тепловой насос с отопительным коэффициентом 5,65 работает таким образом, что к каждому потребленному им 1 кВт энергии он произведет дополнительные 4,65 кВт тепловой энергии. Иначе говоря, из каждых 5,65 кВт энергии, затрачиваемых на нужды отопления и горячего водоснабжения, платить придется всего лишь за 1 кВт.

Обсуждение

Проведенный анализ литературных источников и термодинамический анализ показал, что при использовании теплового насоса для подготовки горячей воды с заданными параметрами наблюдается значительный энергосберегающий эффект в виде экономии жидкого топлива, а также в количестве потребляемой за год электроэнергии. Нельзя не отметить, что использование тепловых насосов для производства горячей воды для систем отопления и горячего водоснабжения в некоторых случаях более эффективно и экономично, нежели работа централизованных систем водяного отопления и горячего водоснабжения зданий и сооружений.

Заключение

В представленной статье предложены возможные пути и способы полезного использования тепловой энергии, полученной при работе конденсаторов тепловых насосов.

Таким образом, рассмотренные системы с тепловым насосом можно использовать не только для обеспечения работы систем отопления и горячего водоснабжения жилых домов, но и для помещений животноводческих ферм и комплексов.

Однако прежде чем принимать окончательное решение о выборе способа получения горячей воды, необходимо провести сравнительные технико - экономические расчеты работы тепловых насосов и централизованных систем, которые используются для получения тепловой энергии.

References

1. Хайнрих Г., Найорк Х., Нестлер В. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения / Пер. с нем. М.: Стройиздат, 1985. 351 с.
2. Usenkov R.A. Utilization of bathygenic heat of the earth for heating and hot water supply in living houses // *World Engineering & Applied Sciences Journal*. 2017. Vol.8. №3. P.142-144. DOI: <https://doi.org/10.5829/idosi.weasj.2017.142.144>
3. Файнзилбер Э.М. Теплонасосные установки в сельском хозяйстве: Обзорная информация. М.: ВНИИТЭИагропром, 1983. 61 с.
4. Данилов Р.Д. Теплонасосная установка для охлаждения молока // *Холодильная техника*. 1979. №11. С.27-29.
5. Кокорин О.Я. Энергосберегающие системы микроклимата животноводческих помещений // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 1986. №6. С.37-39.
6. Демин А.В. Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в животноводстве и кормопроизводстве: Сб. научн. тр. ВИЭСХ. М.: ВИЭСХ, 1982.
1. Hainrich G. Teplonasosnye ustanovky dlya otopeniya i goryachego vodosnabzhenia [Heat pump installations for heating and hot water supply], Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 351 p.
2. Usenkov R.A. Utilization of Bathygenic Heat of the Earth for Heating and Hot Water Supply in Living Houses. *World Engineering & Applied Sciences Journal*, 2017, v.8, no.3, pp.142-144.
3. Fainzilber E.M. Teplonasosnye ustanovky v selskom khozyaistve [Heat pump installations in agriculture], Moscow, VNIITElagroprom Publ., 1986. 61 p.
4. Danilov R.D. Teplonasosnaya ustanovka dlya ohlazhdeniya moloka [Heat pumping unit for milk cooling], *Kholodilnaya tehnika – Refrigeration technology*, 1979, no 11, pp. 27-29.
5. Kokorin O.Ja. Energoberegayushie systemy mikroklimate zhivotnovodcheskih pomesheniy [Energy-saving microclimate system for livestock premises], *Mechanizatsia i elektrifikatsia selskogo khozyaistva – Mechanization and electrification of agriculture*, 1986, no 6, pp. 37-39.
6. Demin A.V. Povysheniye effektivnosti ispolzovaniya toplivno-energeticheskikh resursov v zhivotnovodstve i kormoproizvodstve [Improving the efficiency of use of fuel and energy resources in animal husbandry and fodder production], *Sbornik nauchnykh trudov VIESKH, Moscow, VIESH Publ.*, 1982