

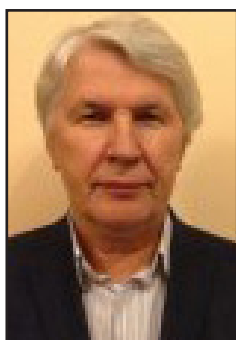


Тепловые насосы как ресурс энергосбережения на объектах железных дорог



Вера МЕДВЕДЕВА
Vera M. MEDVEDEVA

Евгений ПИРОГОВ
Evgeny N. PIROGOV



Василий СЕМЕНОВЫХ
Vasily A. SEMENOVYKH

Медведева Вера Михайловна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.
Пирогов Евгений Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» МИИТ, Москва, Россия.
Семеновых Василий Анатольевич — главный инженер Центральной дирекции тепловодоснабжения — филиала ОАО «РЖД», Москва, Россия.

Heat Pumps as a Resource for Energy Efficiency on Railway Facilities
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 235)

Поскольку микроклимат в производственном помещении нельзя рассматривать изолированно от целого ряда оценочных факторов (критериев), авторы обосновывают выбор тепловых насосов в качестве возможной альтернативы теплоснабжения с экологической, энергетической и эксергоэкономической точек зрения. При этом система аргументации прямо связана со спецификой объектов железных дорог и совокупностью технологических факторов безопасности, надежности предлагаемых вариантов.

Ключевые слова: теплоэнергетика, тепловой насос, железные дороги, эксергоэкономика, экология.

Теплоснабжение производственных помещений, в особенности удаленно расположенных от централизованного источника, предполагает возможности альтернативного способа отопления. Одним из таких способов является использование тепловых насосов.

Назначение установок для отопления помещений состоит в обеспечении требуемой температуры внутри помещений при любой наружной температуре в отопительный период. Обычно система отопления производственных помещений бывает децентрализованной, а температура в помещении может незначительно отличаться от температуры наружного воздуха, и для этих условий применение тепловых насосов является очень перспективным. Учитывая характер технологических процессов, реализуемых на предприятиях ОАО «РЖД», их специфике больше всего отвечают парокомпрессионные тепловые насосы.

Исследования [1–3] показывают, что потенциал энергосбережения за счет реконструкции и внедрения теплонасосной тех-

ники составляет порядка 60% от общего потребления энергии. Вместе с тем реализация этого потенциала требует, помимо прочего, использования современных методов комплексного анализа и диагностики систем термотрансформации, на основе которых можно получить максимальный эффект энергосбережения при минимуме финансовых затрат.

К настоящему времени эффективность отдельных элементов тепловых насосов в ряде случаев достигла такого уровня, что улучшение их конструкций уже не оказывает существенного влияния на повышение эффективности всей системы термотрансформации. И основным резервом энергосбережения становится совершенствование общих структурно-параметрических характеристик с учетом взаимосвязи и взаимовлияния элементов схемы.

Обязательными условиями эффективного применения тепловых насосов является наличие достаточных ресурсов низкопотенциальной теплоты и отсутствие ограничений в их присоединении к сети электроснабжения.

На данном этапе нет технических ограничений на применение тепловых насосов как по типу и мощности, так и виду используемого источника низкопотенциальной теплоты. Их выбор для теплоснабжения производственных объектов обосновывается технико-экономическими расчетами в зависимости от величины тепловых нагрузок зданий, условий их размещения, доступности и параметров источника низкопотенциальной теплоты.

Сегодня нет единого критерия (оценочного фактора), на основании которого можно было бы однозначно определить целесообразность применения тепловых насосов. Три фактора одновременно влияют на принятие решения: экологический, энергетический и экономический.

Экологический фактор основывается на анализе выбросов в атмосферу тепла и вредных веществ — CO_2 , N_2O , NO_x , CO и других углеводородов, влияющих на глобальное потепление. Отметим, что этот фактор был предложен для экологической оценки холодильного и теплонасосного оборудования, и поэтому основывается на анализе вредного влияния рабочих веществ на окружающую среду при попадании их в ат-

мосферу. Отсюда можно сделать вывод, что теплонасосная система (при работе в безаварийном режиме) не имеет выбросов в атмосферу, а потому является экологически чистой для потребителя.

Энергетический фактор многие годы был единственным, реально формализованным и широко используемым оценочным показателем. Для традиционных систем теплоснабжения — это КПД (η), для тепловых насосов — коэффициент преобразования теплового насоса (μ). Если учесть, что величина КПД в самом общем случае изменяется в пределах $0 < \eta < 1$, а другая величина в пределах $1 < \mu < \infty$, то излишне пояснять некорректность их использования при сравнительном анализе различных систем теплоснабжения.

Использование эксергетического КПД способно объективно оценить эффективность любой из систем теплоснабжения:

$$\epsilon = \frac{E_{nc}}{E_m}, \text{ где } E_{nc} \text{ — эксергия продукта систе-}$$

мы (произведенного тепла), E_t — эксергия топлива системы (затраченного первичного топлива) [4].

С появлением термoeкономики (эксергоэкономики) как инструмента для анализа и оптимизации принятие решения о рациональности использования тепловых насосов значительно облегчилось, так как слияние энергетического и экономического факторов понизило размерность решаемой задачи и позволило сформулировать однозначный ответ об эффективности применения той или другой систем теплоснабжения.

Коэффициент преобразования идеального цикла Карно для отопления в течение отопительного периода при средней наружной температуре 277°K и температуре внутри помещения 293°K составляет $\epsilon_k = 18,66$. Отопительные системы с тепловыми насосами имеют коэффициент преобразования существенно меньший. Они не могут работать с традиционными нагревательными приборами (радиаторами), использующими в большинстве случаев горячую воду с температурой $90\text{--}110^\circ\text{C}$. Теплонасосные отопительные установки с температурой горячей воды 55°C имеют коэффициент преобразования, находящийся ниже предельно допустимых значений экономически эффективного применения. Поэтому экономический



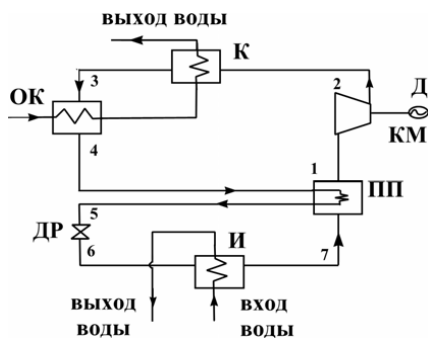


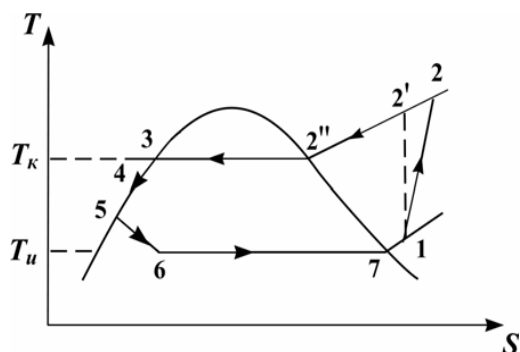
Рис. 1. Принципиальная схема ТНУ и круговой процесс в T, S -диаграмме: КМ – компрессор; К – конденсатор; И – испаритель; Д – двигатель; ОК – охладитель конденсата рабочего тела; ДР – дроссель; ПП – перегреватель пара рабочего тела.

эффект от применения тепловых насосов в системах теплоснабжения достигается только при использовании низкотемпературных систем.

Тепловой насос – устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (с низкой температурой) к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой. Термодинамически тепловой насос представляет собой обращённую холодильную машину. Если в холодильной машине основной целью является производство холода путём отбора теплоты из какого-либо объёма испарителем, а конденсатор осуществляет сброс теплоты в окружающую среду, то в тепловом насосе картина обратная. Конденсатор является теплообменным аппаратом, выделяющим теплоту для потребителя, а испаритель – теплообменным аппаратом, утилизирующим низкопотенциальную теплоту: вторичные энергетические ресурсы и (или) нетрадиционные возобновляемые источники энергии.

Тепловой насос работает следующим образом (рис. 1). Тепло от теплоотдатчика (например, тепловая энергия грунта, сбросные потоки или солнечная энергия) подводится к рабочему агенту в испарителе. В результате подвода тепла рабочий агент кипит в испарителе при давлении $P_{\text{и}}$ и температуре $T_{\text{и}}$. Пар, полученный в испарителе, поступает в компрессор. В компрессоре пар рабочего агента сжимается от давления $P_{\text{и}}$ до давления $P_{\text{к}}$. Температура конденсации пара при этом соответственно повышается от $T_{\text{и}}$ до $T_{\text{к}}$.

Из-за трения и необратимого теплообмена процесс сжатия в компрессоре 1–2 не совпадает с изотропным сжатием 1–2'. Из



компрессора пар поступает в конденсатор (К), где в результате отвода тепла к теплоприемнику происходит охлаждение рабочего агента и конденсация пара. Для повышения эффективности цикла иногда осуществляют внутренний регенеративный теплообмен между потоком жидкого рабочего тела (хладагента) перед дросселем и потоком пара перед компрессором (через охладитель конденсата рабочего тела ОК). В результате теплообмена жидкое рабочее тело дополнительно охлаждается (процесс 4–5 на рис. 1), а его насыщенный пар перегревается (процесс 7–1). После охладителя жидкий хладагент проходит через дроссель (ДР), где в результате дросселирования давление рабочего агента падает от $P_{\text{к}}$ до $P_{\text{и}}$ и температура снижается, а жидкий агент опять поступает в испаритель.

Энергетическая эффективность теплового насоса оценивается коэффициентом преобразования

$$\mu = \frac{Q_{\text{к}}}{L}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{к}}$ – тепловой поток в конденсаторе, кДж; L – работа, затраченная в цикле, кДж.

Для идеального теплового насоса

$$\mu_{\text{ид}} = \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{к}} - T_{\text{и}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{и}}$, $T_{\text{к}}$ – температура рабочего тела в конденсаторе и испарителе соответственно.

Энергетическая эффективность теплового насоса повышается как с ростом температуры конденсации, так и уменьшением разницы температур между конденсатором и испарителем. Эта разница определяется температурой испарителя, которая, в свою очередь, связана с низкотемпературным источником.

Тепловой поток в конденсаторе складывается из теплового потока в испарителе и работы цикла:

$$Q_k = Q_{\text{и}} + L, \quad (3)$$

где $Q_{\text{и}}$ — представляет собой сумму теплового потока в испарителе, кДж.

Тепловой поток в конденсаторе отводится водой, которая используется для отопления и горячего водоснабжения. Тепловой поток для отопления промышленного помещения определяется как

$$Q_k = k \cdot F \cdot (T_{\text{ГВ}} - T_{\text{В}}), \quad (4)$$

где k — коэффициент теплопередачи, Вт/м² град; F — площадь поверхности нагрева, м²; $T_{\text{ГВ}}$, $T_{\text{В}}$ — температура соответственно горячей воды в системе отопления и воздуха в помещении.

Таким образом, необходимо отметить, что по теории используется 100% тепловой энергии, причем 25% энергии затрачивается на работу компрессора, а остальные 75% забираются у низкопотенциальных источников тепла (земли, воды, солнца).

Для отопления помещения водой с температурой, характерной для тепловых насосов (50–55°C), необходима развитая поверхность отопительных приборов или трубопроводная система теплых полов. Другая возможность использования горячей воды, приготовленной теплонасосной установкой, — ее применение в качестве теплоносителя при воздушном отоплении помещений.

Определяющим аргументом при обосновании и проектировании системы теплоснабжения с тепловыми насосами является выбор источника низкопотенциальной теплоты, его расположение и параметры.

Источниками низкопотенциальной теплоты для тепловых насосов могут быть: вытяжной воздух, наружный воздух, грунт, сточные воды, подземные и поверхностные воды и вторичные тепловые энергоресурсы различного происхождения.

Теплота наружного воздуха как источник низкопотенциальной теплоты характеризуется сезонными и краткосрочными колебаниями температуры, что влечет за собой колебания режимов теплового насоса, снижающие его эффективность. Средний уровень температуры окружающего воздуха влияет на коэффициент трансформации — чем ниже температура, тем ниже коэффициент трансформации.

Грунтовые и подземные воды имеют постоянную температуру и высокие теплофизические характеристики. Использование их в качестве низкопотенциального источника теплоты представляется предпочтительным ввиду доступности и кажущейся простоты схемы низкотемпературного (до 50°C) теплоснабжения, заключающейся в подаче воды в испаритель теплового насоса и ее возврате через соответствующие скважины. Но если вода непроточная, то не исключено перемешивание охлажденной и грунтовой воды, т.е. деградация источника тепловой энергии вплоть до полного истощения.

Вытяжной воздух является эффективным и доступным для использования в качестве низкопотенциального источника теплоты в системах теплоснабжения отдельных жилых зданий. Температура вытяжного воздуха стабильна в течение отопительного периода и составляет в среднем 18°C. Объемы удаляемого воздуха зависят от назначения и площади вентилируемых помещений.

Грунт верхних слоев земли, как и наружный воздух, представляет собой тепловой аккумулятор неограниченной емкости. Эффективность использования теплоты грунта определяется главным образом температурным режимом грунта в годовом цикле и зависит от его состава, влажности, температуры воздуха и др. Технически возможны системы отбора теплоты грунта с применением теплообменников из пластиковых труб разного диаметра: горизонтального исполнения (змейки, петли и др.), укладываемые с заглублением на 1,5–2,0 м в грунт, и вертикального (зонды) — в скважины разной глубины. Для оценочных расчетов принимается значение удельного теплового потока 45 Вт на 1 метр длины зонда. В связи с тем, что с каждым годом площадь охлажденного массива грунта будет увеличиваться, возникает вопрос о масштабах этого процесса и его влиянии на окружающую среду.

Время релаксации температуры грунта приблизительно равно времени охлаждения грунта, используемого как низкотемпературный источник энергии для теплонасосной установки. Так, если на летний период (май–сентябрь) полностью отключить отбор тепла из грунта, т.е. остаться без



горячего водоснабжения, то к октябрю произойдет практически полная релаксация.

Сточные воды очень перспективный, но пока мало используемый для теплоснабжения источник низкопотенциальной теплоты, что обусловлено их биологической и коррозионной агрессивностью, неравномерным режимом потока в канализационной сети. Однако следует различать сточные воды промышленного происхождения, состав которых более предсказуем, от сточных вод биологической очистки. Объемы и температура промышленных сточных вод зависят от технологического процесса и температуры водопроводной воды. Поэтому минимальная температура сточных вод, до которой допустимо их понижение в теплообменниках-утилизаторах, должна быть не ниже температуры, при которой температура смешанных сточных вод при их поступлении на очистные сооружения будет не ниже установленных регламентами. Уходящие со сточными водами отходы теплоты довольно эффективно можно перевести с помощью тепловых насосов на полезный температурный уровень. Особый интерес для этих целей представляют сточные воды с температурой ниже 30°C.

Вода оборотного водоснабжения. В большинстве случаев она служит для отвода тепла от технологического оборудования. Большое значение имеет выбор места в контуре циркуляции воды, где вода охлаждается настолько, что улучшается технологический процесс и при этом она является источником теплоты для тепловых насосов. Охлаждение оборотной водой используется во многих технологических процессах: в градирнях для охлаждения конденсаторов холодильных машин, компрессоров, конденсаторов электростанций и т.п.

Солнечная энергия используется в качестве источника низкопотенциальной теплоты через использование концентрирующих и непосредственно поглощающих

солнечный поток солнечные коллекторы (панели). При концентрации солнечного излучения получают высокие плотности теплового потока и соответственно высокие температуры нагреваемого тела. Однако применение солнечных коллекторов в зимний и переходный периоды на территории РФ крайне ограничено незначительной плотностью солнечной радиации, облачностью, низкими температурами окружающей среды, снежными покровами.

ВЫВОДЫ

Рассмотрев основные положения применения тепловых насосов для отопления и горячего водоснабжения, а также потенциал и доступность источников низкопотенциальной теплоты, можно утверждать, что эффективность применения тепловых насосов, при всех прочих равных условиях, существенно зависит от соотношения стоимости электрической и тепловой энергии в данном регионе. При низкой стоимости электроэнергии и высокой стоимости тепловой энергии использование тепловых насосов в системе теплоснабжения перспективно.

Таким образом, тепловые насосы являются экономичным способом отопления промышленных объектов. Не требуется подвода дорогостоящих теплотрасс. В результате, имея всего лишь электроснабжение и водоснабжение, с помощью тепловых насосов можно целиком обеспечить автономность создания и поддержания требуемого микроклимата на отдельно стоящем объекте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии. — М., 2001. — 66 с.
2. Хайнрих Г., Найорк Х., Нестлер В. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения. — М.: Стройиздат, 1985. — 351 с.
3. Долинский А. А., Драганов Б. Х., Морозук Т. В. Альтернативное теплоснабжение на базе тепловых насосов: критерии оценки // Промышленная теплотехника. — 2007. — № 6. — С. 67–71.
4. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Энергетический метод и его приложения. — М.: Химия, 1988. — 279 с.

Координаты авторов: **Медведева В. М.** — v.m.medvedeva2010@yandex.ru, **Пирогов Е. Н.** — pirogov_e49@mail.ru, **Семеновых В. А.** — semenovyhva@cdrv-rzd.ru.

Статья поступила в редакцию 22.07.2016, принята к публикации 29.08.2016.