УДК 621.483

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА СУХОГО ГРУНТА ПРИ РАБОТЕ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ

Мезенцева Н.Н.[1], Мезенцев И.В.[1], Елистратов Д.С.[1], Елистратов С.Л.[2], Мелешкин А.В.[1]

[1]*Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2]*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-08-31621

АННОТАЦИЯ

Тепловые насосы для малоэтажного теплоснабжения в Сибири являются реальным средством энергосбережения, обеспечивая экологически чистые условия проживания. Эффективность применения теплового насоса проявляется в сравнительном анализе с традиционными системами теплоснабжения. Возможность загрязнения окружающей среды при использовании теплового насоса обусловлена только выбросами, связанными с производством электрической энергии обеспечивающей работу теплового насоса. Действующий тепловой насос непосредственно на месте его установки не дает вредных выбросов. Срок окупаемости тепловых насосов составляет от 4 до 7 лет, а стоимость тепла генерируемого энергоустановками на их основе ниже на 25-40% от стоимости тепла, отпускаемого от ТЭЦ. Целью работы являлось изучение, на примере натурного объекта, эффективности использования тепла грунта для теплонасосного теплоснабжения малоэтажных жилых домов с применением технологий горизонтальной, и вертикально-наклонной прокладки трубопроводов низкопотенциального подземного контура тепла. В работе проведены экспериментальные исследования, представлен эксергетический анализ, выполнены термодинамические расчеты. Показано, что коэффициент преобразования цикла для теплового насоса, использующего в качестве низкопотенциального источника тепло сухого грунта, составляет от 4.0 до 4.5, что является высоким показателем.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема энергосбережения в России приобретает первостепенное значение и входит в число пяти основных направлений инновационного развития России.

Традиционными средствами теплоснабжения коттеджей и загородных домов являются газовые и электрические нагревательные устройства мощностью до 30 кВт. Отпускные цены на природный газ и электроэнергию непрерывно растут. Тепловые насосы представляют реальную энергосберегающую альтернативу традиционным видам отопления и широко используются в странах с умеренно-холодным климатом. Мнения специалистов о проблеме их эффективного использования в природно-климатических условиях Сибири расходятся, что предопределяет необходимость проведения натурных сравнительных исследований этой технологии теплоснабжения в природно-климатических условиях Сибири.

Для теплонасосного теплоснабжения малоэтажных жилых домов большой практический интерес представляет задача использования тепла грунта с применением горизонтальной, вертикальной и вертикально-наклонной прокладки трубопроводов низкопотенциального контура. Затраты на их создание нередко сопоставимы со стоимостью тепловых насосов, так например, для горизонтальной прокладки требуются участки большой площади и строительная техника. А для вертикального контура необходимо дорогое бурильное оборудование

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования эффективности теплонасосного теплоснабжения малоэтажных жилых домов с применением различных технологий создания низкопотенциальных контуров тепла была достигнута договоренность с владельцами домов о проведении натурных испытаний.

Следует отметить, что данные объекты расположены в пригородной зоне г. Новосибирска.

Рис. 1 Горизонтальный низкопотенциальный контур.

Первый объект представляет собой коттедж площадью 270 м^2, имеющий два этажа, подвал, гараж. На этом объекте был смонтирован горизонтальный низкопотенциальный контур тепла общей протяженностью 1000 м, расположенный в пределах приусадебного участка. Контур представляет собой полиэтиленовую трубу с наружным диаметром 26 мм. Низкопотенциальный контур заправлен незамерзающим теплоносителем до температуры -20 °С. На рис. 1 показана прокладка горизонтального подземного контура низкопотенциального источника тепла.

В подвальном помещении установлен опытный тепловой насос номинальной теплопроизводительностью 12 кВт, работающий на озонобезопасном смесевом хладагенте R407C (рис. 2). Система отопления здания радиаторного типа с увеличенным числом секций до 24 шт. под каждым окном. Все системы теплового насоса оборудованы измерительными приборами, сбор данных производился в автоматическом режиме.

Второй объект представляет собой коттедж площадью 330 м^2, имеющий также два жилых этажа и подвал. На этом объекте имеются 6 вертикально-наклонных скважин глубиной по 35 м. В каждой скважине находится полиэтиленовая труба с наружным диаметром 32 мм и толщиной стенки 4 мм. В подвальном помещении установлен опытный тепловой насос (рис. 3) номинальной теплопроизводительностью 9 кВт, работающий на озонобезопасном смесевом хладагенте R407C.

Особенностью данного объекта является система отопления, встроенная в конструкцию пола (рис. 4). Это позволяет при незначительном нагреве пола (до 30 °С) отапливать здание в соответствии со стандартами низкого энергопотребления.

Проведенные экспериментальные измерения показали, что средняя температура теплоносителя низкопотенциального контура при горизонтальной прокладке в ноябре составила +2 °С. Температура теплоносителя низкопотенциального контура при вертикально-наклонной прокладке в ноябре -4 °С. С понижением температуры наружного воздуха происходит вымораживание участка. Как показывают наблюдения, горизонтальный низкопотенциальный контур на начальном этапе имеет более высокую температуру грунта.

Рис. 2 Тепловой насос номинальной теплопроизводительностью 12 кВт.

Рис. 3 Тепловой насос номинальной теплопроизводительностью 9 кВт.

Для сопоставления экспериментальных данных с расчетными величинами был выполнен теоретический расчет показателей теплового насоса. Тепловой насос состоит из испарителя, компрессора, конденсатора, переохладителя и системы вентилей, что соответствует действующим установкам, расположенным на рассматриваемых объектах. Теплота, отобранная от теплоносителя (после конденсатора) идет на перегрев паров хладагента перед входом в компрессор. В качестве рабочего тела в тепловых насосах использо-

валась неазеотропная трехкомпонентная смесь R407C. При обработке опытных данных свойства исследуемой смеси R407C определялись по международной базе данных REFPROP Version 8.0 [1].

Рис. 4 Распределительный узел подачи системы отопления в коттедже

Расчетный термодинамический цикл теплового насоса для системы отопления на смесевых хладагентах представлен на рис. 5. Процесс кипения (5-1) происходит при переменной температуре и постоянном давлении. Затем сухой насыщенный пар поступает в пароперегреватель (1-1′). Далее перегретый пар подается в компрессор (1´-2´). Значение энтальпии в точке 2´ вычисляется с учетом влияния индикаторного КПД компрессора. Конденсация паров хладагента в процессе (2-3) происходит при переменной температуре. В этом цикле теплота переохлаждения (3-4) идет на перегрев паров хладагента перед входом в компрессор (1-1′). Перегрев паров хладагента после испарителя приводит к повышению конечной температуры сжатия (точка 2′), в результате возрастает разность удельных энтальпий для полезной теплоты и, как следствие, увеличивается коэффициент преобразования энергии в тепловом насосе.

В таблицу 1 сведены значения температур в контрольных точках цикла, полученные в ходе эксперимента.

В качестве критерия эффективности термодинамического цикла принят коэффициент преобразования энергии:

$$\varphi = q_K / Al_Д \qquad (1)$$

$Al_Д$ – действительная работа, затраченная на сжатие паров хладагента в компрессоре, кДж/кг;

q_K – тепловая нагрузка потребителей, кДж/кг.

Общей термодинамической закономерностью для всех рабочих тел является сокращение работы сжатия и увеличение коэффициента преобразования энергии в теплонасосном цикле при уменьшении перепада температур между процессами конденсации и кипения.

Расчет эффективности одноступенчатого теплонасосного цикла на R407C для низкопотенциального контура с горизонтальной и вертикально-наклонной прокладкой земляного контура представлен в таблице 2.

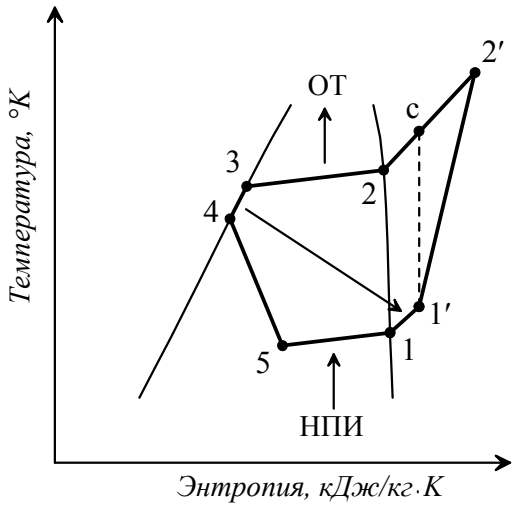

Рис. 5 Термодинамический цикл теплового насоса на неазеотропных смесях хладагентов (НПИ – низкопотенциальный источник теплоты; ОТ – система отопления).

Тепловой насос, использующий в качестве низкопотениального источника теплоту грунта с вертикально-наклонной прокладкой трубопроводов, имеет коэффициент преобразования на 10 % выше, чем при использовании теплоты грунта горизонтального контура. Это связано с тем, что разница температур между процессами кипения и конденсации при использовании теплоты грунта при вертикально-наклонном низкопотенциальном контуре меньше на 4 °С. Чем меньше разница температур между процессами кипения и конденсации тем выше коэффициент преобразования. Следует отметить, что данные расчеты справедливы для рассматриваемого месяца, дальнейшие результаты могут изменяться вследствие уменьшения теплопритоков к исследуемым контурам.

Также был выполнен эксергетический анализ используемого термодинамического цикла в теплонасосных установках на неазеотропных смесях хладагентов. Определение эксергии дает возможность сопоставлять различные виды энергии по их ценности с точки зрения получения работы за их счет, а потери эксергии позволяют судить о термодинамическом совершенстве процессов преобразования энергии [2, 3]. На основании результатов эксергетического анализа определяется последовательность и целесообразность возможных улучшений в конструкции для различных режимов работы теплового насоса. В ча-

стности был проведен расчет эксергетических потерь, эксергетического кпд для теплонасосного цикла на R407C для низкопотенциального контура с горизонтальной и вертикально-наклонной прокладкой земляного контура. Полученные результаты сведены в таблицу 3.

Показателем термодинамического совершенства процесса служит эксергетический коэффициент полезного действия, равный отношению эксергии, полученной в результате совершения процесса, к затраченной эксергии:

$$\eta_{TH} = (e^{вх} - \sum d) / e^{вх} \qquad (2)$$

Видно, что в нашем случае значения эксергетического кпд для теплового насоса, использующего в качестве низкопотениального источника теплоту грунта с вертикально-наклонной прокладкой трубопроводов, на 5,5 % выше, чем при использовании теплоты грунта горизонтального контура. Значительные потери эксергии происходят в таких элементах, как компрессор, конденсатор и дроссельное устройство. Таким образом, имеется значительный резерв для совершенствования как отдельных элементов, так и всего теплового насоса в целом за счет сведения к минимуму технических потерь эксергии.

Таблица 1

Тип скважины	*Температура в контрольных точках цикла, °С*				
	1	*1'*	*2*	*3*	*5*
Горизонтальная	-3	4	45	41	-10
Вертикально-наклонная	-9	-2	35	31	-16

Таблица 2

Параметр	*Горизонтальная скважина*	*Вертикально-наклонная скважина*
Теоретическая работа компрессора, *Al*, Дж/кг	36,73	35,61
Действительная работа компрессора $Al_Д$, Дж/кг	50,08	46,93
Удельная производительность в цикле, $q_к$, кДж/кг	202,74	212,35
Коэффициент преобразования цикла, φ	4,05	4,52

Таблица 3

Параметр	*Горизонтальная скважина*	*Вертикально-наклонная скважина*
Эксергия входа, $e^{вх}$	50,08	46,93
Суммарные эксергетические потери, Σd	30,18	27,21
Эксергетический кпд, η_{TH}	0,397	0,420

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследований, очевидно, что работа теплонасосной установки с горизонтальным низкопотенциальным подземным контуром тепла будет эффективна только до наступления сильных морозов (до -15 °С). Такой недостаток обусловлен тем, что владелец коттеджа не рассчитал на какой глубине, должен находиться контур. По рекомендации продавцов климатической техники, которые не учли холодный климат сибирского региона, контур был проложен на глубине до 1.8 м. На такой глубине отсутствуют теплопритоки земли, что в дальнейшем при работе теплового насоса может привести к вымораживанию земельного участка. В обоих рассмотренных нами случаях отсутствует техническая документация на подземный контур, что затрудняет исследовательскую часть работы. Данные объекты находятся на стадии завершения строительства, что не позволило исследовать эффективность применения тепловых насосов в широком диапазоне температур и режимов их использования (отопление + горячее водоснабжение + подогрев бассейна + отопление теплиц и т.д.). В дальнейшем планируется провести испытания на объекте с постоянным проживанием владельцев.

Теплонасосные установки для отопления малоэтажной застройки относятся к инициативным проектам, которые выполняются непосредственно владельцами коттеджей без учета климатических условий Сибири, и проводятся без участия специализированных проектных организаций. Это приводит к снижению эффективности их использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. NIST Thermodynamic and Transport Properties. Standard Reference Database 23, version 8.0. 2007.
2. Бродянский В.М. Эксергетический метод анализа и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек – М.: Энергоатомиздат, 1988, – 288 с.

   Brodyansky, V.M., Fratsher, V and Michalek K. (1988), Exergic method of analysis and its applications, M.: Energoatomizdat.
3. Александров, А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок / А.А. Александров. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007, – 158 с.

   Aleksandrov, A.A. (2007), Thermodynamic fundamentals cycles of thermal power plants, M.: Publishing house MEI.