

УДК 644.1

Колесниченко Н.В., Константинов Г.Е., Дмитренко М.А.

Донецкий национальный технический университет

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В УКРАИНЕ

Виконана оцінка енергетичної та економічної доцільності впровадження теплових насосів у системі опалювання та гарячого водопостачання. Показано, що при існуючих цінах на паливо й електроенергію, а також диференційованому підході до споживачів газоподібного палива для більшості споживачів використання теплових насосів економічно не доцільно, не дивлячись на їх високу енергоефективність.

Произведена оценка энергетической и экономической целесообразности внедрения тепловых насосов в системы отопления и горячего водоснабжения. Показано, что при существующих ценах на топливо и электроэнергию, а также имеющемуся дифференцированном подходе к потребителям газообразного топлива для большинства потребителей использование тепловых насосов экономически нецелесообразно, несмотря на высокую энергоэффективность.

In this paper the analysis of energy and economic feasibility of the introduction of heat pumps into space heating and hot water supply system is made. It is shown that in the presence at the existing fuel and the electric power prices and differentiated approach to consumers of gaseous fuel for the majority of consumers use of heat pumps is economically inexpedient in spite of high power efficiency.

$b$  – удельный расход условного топлива;

$K$  – удельные капиталовложения, приведенные на 1 кВт установленной тепловой мощности теплового насоса;

$L$  – тепловая энергия, передаваемая горячему источнику;

$Q$  – работа, подводимая к тепловому насосу;

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – низшая теплота сгорания используемого топлива;

$T_{\text{ок}}$  – срок окупаемости капиталовложений;

$n_{\text{ч}}^{\text{ок}}$  – число часов использования установленной мощности в году;

$\Delta b_{\text{т}}$  – разность удельного расхода условного топлива в котельной и тепловом насосе;

$\eta_{\text{нт}}^{\text{кот}}$  – к.п.д. отпуска тепловой энергии котельной нетто;

$\eta_{\text{тс}}$  – к.п.д. транспорта тепловой энергии по тепловой сети;

$\eta_{\text{эл.нт}}^{\text{кэс}}$  – электрический к.п.д. КЭС нетто;

$\eta_{\text{эс}}$  – к.п.д. транспорта электроэнергии от станции к потребителю;

$\mu$  – коэффициент преобразования энергии в тепловом насосе;

$\mu^*$  – равновесный показатель, при котором эффективность использования первичного топлива в котельной и теплонасосной установках равны между собой;

$\text{Ц}$  – цена;

АЭС – атомная электрическая станция;

БА – бак-аккумулятор;

ГВС – горячее водоснабжение;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

ТН – тепловой насос;

ТНУ – теплонасосная установка.

**Индексы верхние:**

КЭС – конденсационная электрическая станция;

кот – котельная;

ТНУ – теплонасосная установка.

**Индексы нижние:**

кот – котельная;

т – топливо;

эл.эн – электроэнергия;

п – подающий трубопровод;

о – обратный трубопровод.

Енергоефективність – одна из основных задач, решаемых мировым сообществом в настоящее время. В Украине основой реализации энергетической стратегии на ближайшую

перспективу остается деятельность, направленная с одной стороны на повышение эффективности использования традиционных энергетических ресурсов – газа, угля, нефти,

гидроэнергии, ядерного топлива, с другой – на снижение зависимости от импорта энергоносителей. Вместе с тем, поставлена задача максимального использования возможностей нетрадиционной энергетики, что в перспективе должно позволить полностью решить современные энергетические, экологические и социально-экономические проблемы многих регионов Украины.

Значительным потенциалом энергосбережения обладает внедрение теплонасосных установок, которые могут обеспечить возможность использования в теплоснабжении низкопотенциальную тепловую энергию различных источников: атмосферного воздуха, грунта, сточных вод и т.д.

Проблеме внедрения тепловых насосных технологий посвящены разработки многих авторов. Одни из них анализируют ситуацию использования ТН в децентрализованных системах теплоснабжения [1], другие – практическое внедрение ТН и комплексное энергообеспечение объектов социальной и промышленной отрасли Украины [2], третьи – перспективу внедрения ТН в жилищно-коммунальное хозяйство Украины [3].

Теплонасосные установки, как правило, потребляют в 1,2...2,3 раза меньше первичной энергии, чем при традиционном теплоснабжении. Из 1 кВт электрической мощности, которая затрачивается на обеспечение работы ТН, может получаться 2...6 кВт тепловой мощности на выходе в зависимости от условий. Применение ТНУ способствует защите окружающей среды за счет сокращения теплового загрязнения и снижения количества вредных выбросов продуктов сгорания.

Термодинамическую эффективность работы теплового насоса характеризует коэффициент преобразования энергии, который равен отношению тепловой энергии, подводимой к горячему источнику, к работе, подводимой к теплому насосу:

$$\mu = \frac{Q}{L}. \quad (1)$$

Коэффициент  $\mu$  всегда больше единицы

и существенно зависит от величины подъема температуры рабочего тела в тепловом насосе.

Различные типы тепловых насосов используют либо непосредственно подводимую работу (например, ТНУ компрессионного типа), либо работоспособность высокотемпературного источника тепла (например, абсорбционные ТН). Для топливно-энергетического баланса важной характеристикой является потребление исходного топлива и производство конечного тепла, что позволяет сравнивать любые типы тепловых насосов.

Для анализа энергетической эффективности используем значение удельного расхода условного топлива. Удельный расход условного топлива на производство и передачу тепловой энергии при использовании теплового насоса компрессионного типа  $b_T^{ТНУ}$ , г у.т./кВт·ч, имеет вид:

$$b_T^{ТНУ} = \frac{122,9}{\mu \cdot \eta_{эл.ТН}^{КЭС} \cdot \eta_{эс}^{КЭС} \cdot \eta_{Тс}^{кот}}. \quad (2)$$

Определим, при каких значениях  $\mu$  использование теплового насоса выгоднее котельной, записав соответствующее выражение для экономии топлива,  $\Delta b_T$ , г у.т./кВт·ч:

$$\begin{aligned} \Delta b_T &= b_T^{кот} - b_T^{ТНУ} = \\ &= 122,9 \cdot \left( \frac{1}{\eta_{нт}^{кот} \cdot \eta_{Тс}^{кот}} - \frac{1}{\mu \cdot \eta_{эл.нт}^{КЭС} \cdot \eta_{эс}^{КЭС} \cdot \eta_{Тс}^{кот}} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что при

$$\mu > \frac{\eta_{нт}^{кот}}{\eta_{эл.нт}^{КЭС} \cdot \eta_{эс}^{КЭС}} \quad (4)$$

более выгодной является схема на базе теплового насоса. Например, при  $\eta_{нт}^{кот} = 0,9$  и  $\eta_{эл.нт}^{КЭС} \cdot \eta_{эс}^{КЭС} = 0,35$  получим значение  $\mu > 2,57$ . Значение коэффициента  $\mu = 2,57$  показывает, что эффективность использования первичного топлива в котельной и теплонасосной установках будут равны между собой. Значение коэффициента преобразования энергии в современных тепловых насосах могут быть как выше, так и ниже полученного, поэтому более рациональной будет бинарная схема выработки тепловой энергии с использованием котла и

ТНУ.

Данная оценка выполнена для условий, когда электроэнергия, потребляемая ТН, производится на ТЭС. Однако в Украине ТЭС вырабатывают менее 50 % всей электроэнергии, а порядка 40 % производства электроэнергии приходится на АЭС. Энергия АЭС существенно дешевле, чем у ТЭС, т.е. реальное значение  $\mu$ , при котором ТН эффективны для условий Украины, должен быть ниже, чем полученное значение.

Кроме энергетической оценки целесообразности использования ТНУ, есть и чисто экономическая. Экономическая оценка позволяет определить значение  $\mu$ , при котором выгодно внедрять ТН при сложившихся в стране ценах и тарифах. Одним из основных критериев оценки целесообразности инвестиций в установку теплового насоса является срок окупаемости капиталовложений.

Простой срок окупаемости капиталовложений при замещении нагрузки котельной тепловым насосом, потребляющим электроэнергию, приближенно можно оценить по формуле,  $T_{ок}$ , лет:

$$T_{ок} = \frac{K}{\left( b_{кот} \cdot \Pi_{г} - \frac{\Pi_{эл.эн}}{\mu} \right) \cdot n_{ч}} \quad (5)$$

Удельные капиталовложения, учитывающие стоимость самого теплового насоса, а также работы, связанные с проектом, монтажом и пуско-наладочными работами  $K = 3...8$  тыс.грн/кВт. Из формулы (5) видно, что срок окупаемости теплового насоса будет снижаться с ростом коэффициента преобразования энергии  $\mu$ , увеличением числа часов использования установленной мощности и снижением отношения  $\Pi_{эл.эн}/\Pi_{г}$ .

Таким образом, на основании выражения (5) можно выполнить предварительную оценку целесообразности замещения тех или иных нагрузок котельной за счет использования тепловых насосов конкретного типа в конкретных условиях.

Из выражения (5) также следует, что мероприятие будет окупаемым при условии:

$$\mu > \frac{\Pi_{эл.эн}}{b_{кот} \cdot \Pi_{г}} = \mu^* \quad (6)$$

Для производства 1 кВт·ч тепловой энергии в котельной с  $\eta_{ит}^{кот} = 0,9$  необходимо затратить 0,12 м<sup>3</sup> топлива, имеющего низшую теплоту сгорания 33,5 МДж/м<sup>3</sup>. Сегодня цены на энергоносители в Украине зависят от категории потребителей, количества годового потребления природного газа, класса подключенного напряжения. Таким образом, для каждого случая на основании выражения (6) с учетом тарифов на природный газ и электроэнергию на октябрь 2010 г. можно определить значение равновесного показателя теплового насоса, при котором его установка будет окупаемой. Рассчитанные значения занесем в табл. 1 [4].

Как видно из табл. 1, для населения использование ТНУ возможно и целесообразно, однако такая ситуация сложилась вследствие подорожания природного газа и запаздывания процесса подорожания электроэнергии. В 2009 году  $\mu^*$  для населения с потреблением газа менее 2500 м<sup>3</sup> составляло 4,2, из-за чего фактическое использование ТН было экономически невыгодным.

Население с потреблением газа более 6000 м<sup>3</sup> не имеет смысла рассматривать, т.к. данная часть является незначительной. Для промышленных и непромышленных потребителей, к которым относятся и организации бюджетной сферы с потреблением газа до 6000 м<sup>3</sup> в год, использовать ТНУ нецелесообразно с точки зрения экономики.

Возможна ситуация, когда применение ТНУ за счет снижения потребления газа позволяет перейти в другую ценовую категорию, тем самым уменьшая его стоимость. В этом случае появится дополнительный эффект от применения теплового насоса, и его установка может быть оправдана даже при значениях  $\mu < \mu^*$ .

Такие параметры, как коэффициент преобразования энергии в тепловом насосе  $\mu$ , число часов использования установленной мощности  $n_{ч}$ , существенно зависят от вида нагрузки теплоснабжения, для выполнения которой

Табл. 1. Значения равновесного показателя теплового насоса

№ п/п	Категории потребителей	Годовое потребление газа, м <sup>3</sup>	Тариф газа, грн./тыс. м <sup>3</sup>	Топливная составляющая себестоимости тепла в котельной, грн./кВт·ч	Тариф за ЭЭ, грн./кВт·ч	$\mu^*$
1	Население	$\leq 2500$	725,4	0,09	0,2436	2,80
		$\leq 6000$	1098	0,13		1,85
		$\leq 12000$	2248,2	0,27		0,90
		$> 12000$	2685,6	0,32		0,76
2	Промышленные и непромышленные потребители	$\leq 2500$	725,4	0,09	0,82	9,42
		$\leq 6000$	1098	0,13		6,22
		$\leq 12000$	2248,2	0,27		3,04
		$> 12000$	2685,6	0,32		2,54

предполагается использовать ТН.

Число часов использования установленной мощности ТН, выполняющего нагрузку горячего водоснабжения, определяется следующими факторами: коэффициент сезонной неравномерности нагрузки; длительность остановок на профилактические мероприятия и ремонт; характеристика низкопотенциального источника тепловой энергии; тип используемого теплового насоса; наличие бака-аккумулятора для выравнивания суточного графика нагрузок и др.

При использовании БА в схеме ГВС с ТНУ  $n_{\text{ч}} = 6...7$  тыс. часов. На основании приведенных данных по формуле (5), для установок, работающих с  $\mu = 3...5$ , простой срок окупаемости установки теплового насоса для покрытия нагрузки горячего водоснабжения будет:

- для населения с годовым потреблением природного газа менее 6000 м<sup>3</sup>

$$T_{\text{OK}} = \text{от } 6,5 \text{ до } 47 \text{ лет};$$

- для промышленных и непромышленных предприятий с потреблением газа более 6000 м<sup>3</sup>

$$T_{\text{OK}} = \text{от } 4 \text{ до } 19 \text{ лет};$$

Разброс полученных значений достаточно широк, что говорит о высокой цене ошибки. Можно сделать вывод, что к проектированию тепловых насосов нужно относиться с особой тщательностью, поскольку небольшие отклонения от проектных значений, а также изменение ситуации на рынке могут привести к значительным изменениям экономических показателей.

Коэффициент использования установленной мощности источников тепловой энергии, выполняющих нагрузки отопления значительно ниже, чем при выполнении нагрузки горячего водоснабжения. Это связано с сезонным характером и необходимостью регулирования данного вида нагрузки в соответствии с меняющимися погодными условиями. Для климатических условий Украины коэффициент использования установленной мощности котельных не превышает 0,24, что соответствует  $n_{\text{ч}} = 2100$  ч и в 3 раза ниже, чем для ГВС. Кроме того, из-за необходимости регулирования температуры воды, подаваемой в систему отопления, коэффициент использования установленной мощности тепловых насосов будет также снижаться. Учитывая, что при использовании радиаторных систем отопления средний за отопительный период коэффициент  $\mu$  будет ниже, чем для систем ГВС, сделаем вывод, что самостоятельное выполнение нагрузки отопления тепловыми насосами в условиях Украины экономически нецелесообразно, даже при наличии технической возможности.

Для повышения коэффициента использования установленной мощности теплового насоса необходимо: выполнение тепловым насосом части нагрузки отопления; использование теплового насоса не только для отопления, но и для кондиционирования в летний период.

Последний вариант является очень перспективным. В качестве демонстрации

сравним 2 варианта:

1) нереверсивный кондиционер, работающий только в режиме холода летом, и газовый котёл, работающий в отопительный период;

2) реверсивный кондиционер (чиллер), летом работающий в режиме холода, зимой – в режиме обогрева до температуры  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и газовый котёл, эксплуатируемый при температурах наружного воздуха ниже  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Системы рассчитаны для двухэтажного офисного здания объемом  $1500\text{ м}^3$ , являющегося собственностью предприятия, потребляющего природный газ более  $12000\text{ м}^3$  в год. Чиллер устанавливается на крыше здания, фанкойлы размещаются на полу под окном в каждом помещении. Экономия происходит в отопительный период, поэтому его мы и будем рассматривать.

В системе циркулирует хладоноситель с параметрами  $t_{\text{п}} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{о}} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$  при работе системы в режиме охлаждения и  $t_{\text{п}} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{о}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  при работе системы на обогрев.

Необходимая холодопроизводительность

чиллера для кондиционирования здания по расчетам составляет  $49\text{ кВт}$ . В ней учтены общие теплопритоки, возникающие за счет разности температур внутри помещения и наружного воздуха, а также солнечной радиации, теплопритоки за счет находящейся в нем оргтехники и от людей, находящихся в помещении [5]. Расчетная отопительная нагрузка с учетом объема здания  $1500\text{ м}^3$  составляет  $48\text{ кВт}$  [6]. Это связано с тем, что все теплопоступления в летнее время увеличивают необходимую холодопроизводительность установки, а в зимнее время уменьшают необходимую теплопроизводительность. Выбираем фанкойлы с учетом запаса с номинальными холодопроизводительностью  $4,36\text{ кВт}$  и теплопроизводительностью  $5,35\text{ кВт}$  [7]. Данные величины являются достаточно условными, поскольку зависят от температуры циркулирующего теплоносителя.

На рис. 1 представлена зависимость потребления энергоресурсов от температуры наружного воздуха. Увеличение потребления

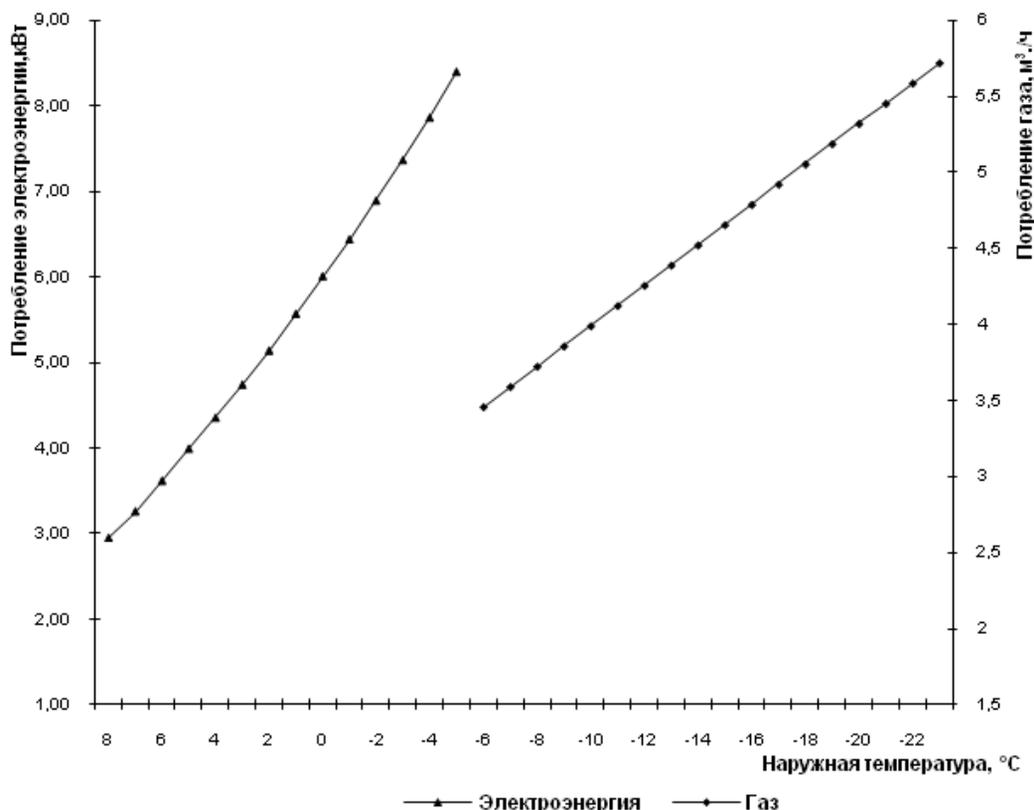


Рис. 1. Зависимость потребления энергоресурсов от температуры наружного воздуха.

электроэнергии в температурном интервале от + 8 до -5 °С связано с увеличением необходимой теплопроизводительности и снижением коэффициента  $\mu$  от 4,47 до 3,27.

Рис. 1 не отражает экономических показателей работы системы. Поэтому для наглядного представления стоимости использования энергоносителей покажем зависимость удельной стоимости топливной составляющей себестоимости от температуры наружного воздуха на рис. 2.

В случае использования реверсивного кондиционера для отопления, в удельных капиталовложениях необходимо учитывать превышение его стоимости, по сравнению с нереверсивным кондиционером той же мощности. Таким образом, стоимость реверсивного кондиционера холодопроизводительностью 52 кВт [8] составляет 254700 грн., а нереверсивного кондиционера той же холодопроизводительности – 224000 грн. Разница составляет 30700 грн. Затраты на энергоносители за

отопительный период: 1 вариант – 34772 грн., 2 вариант – 27950 грн. Экономия затрат составит 6822 грн. Простой срок окупаемости будет равен 5,9 лет.

В настоящее время существует техническая возможность использования реверсивных кондиционеров, которые могут работать в режиме отопления до температур -15 °С. При использовании такого кондиционера дополнительные капиталовложения составляют 127371 грн. Экономия ресурсов будет достигаться, пока температура наружного воздуха не будет ниже -9 °С, поскольку до этого значения выполняется равенство  $\mu < \mu^*$ . Таким образом, экономия затрат увеличится до значения 7767 грн., а простой срок окупаемости составит 21,9 года.

В сложившихся ценовых условиях на сегодняшний день использование дорогих кондиционеров, работающих в режиме отопления до температуры -15 °С пока менее целесообразно, чем более дешевых реверсивных кондиционеров.

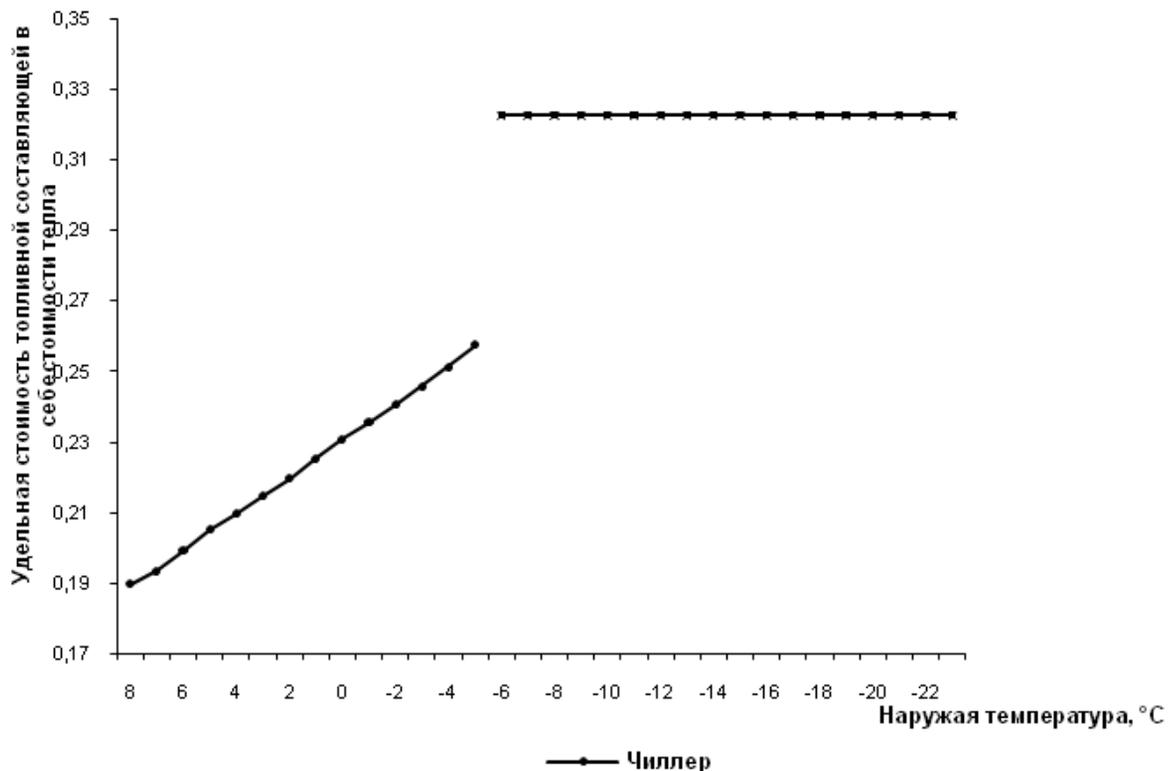


Рис. 2. Зависимость удельной стоимости топливной составляющей себестоимости от температуры наружного воздуха.

**Выводы**

На сегодняшний день для решения проблем энергосбережения тепловые насосы считаются достаточно перспективными среди источников нетрадиционной энергетики благодаря возможности черпать возобновляемую энергию из окружающей среды.

С позиции экономии топливных ресурсов тепловые насосы выгодно эксплуатировать при значении коэффициента преобразования энергии равного от 2,5 и выше. Однако при существующих ценах на топливо, тепло и электроэнергию, а также имеющегося дифференцированного подхода к потребителям газообразного топлива, можно сказать, что для большинства потребителей это экономически нецелесообразно.

Для создания благоприятных условий массового внедрения ТНУ в Украине необходимо: финансирование создания отечественных ТНУ, конкурентоспособных с импортными аналогами; введение специальных тарифов на электроэнергию для пользователей теплонасосной техники; создание льгот и выгодных кредитов при покупке ТНУ; широкое информирование о результатах внедрения ТНУ; разработка «типовых» проектов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Мацевитый Ю.М.* Внедрение теплонасосных технологий // Журнал Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – № 3. – С. 4 – 10.
2. *Яндульський О.С.* Практичне впровадження теплових насосів та комплексне енергозабезпечення об'єктів соціальної та промислової галузі України // Журнал Енергетика и електрифікація. – 2008. – № 2. – С. 44 – 46.
3. *Коренков О.В.* Перспективи впровадження теплових насосів у житлово-комунальному господарстві України // Журнал Енергетика и електрифікація. – 2008. – № 2. – С. 52 – 54.
4. <http://www.nerc.gov.ua/>
5. *Ананьев В.А.* Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика. – М.: Евроклимат, 2001. – 416 с.
6. КТМ 204 України 244-94.
7. [http://www.hiconix.ru/UserFiles/File/Wesper\\_cataloges/Aqu&Fan\\_catalog\\_ru%20.pdf](http://www.hiconix.ru/UserFiles/File/Wesper_cataloges/Aqu&Fan_catalog_ru%20.pdf)
8. <http://www.jetcool.ru/doc/WSAN%20EE%2082-282.pdf>.

*Получено 23.12.2010 г.*