

**УДК 378:62:621.311**

**Г. И. Канюк,**  
доктор технических наук, профессор  
**А. М. Чернюк,**  
кандидат технических наук  
**Т. Н. Пугачёва,**  
кандидат технических наук, доцент  
**В. Ф. Безъязычный**  
(Украинская инженерно-  
педагогическая академия)

### **ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛООВОГО НАСОСА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЁ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Постановка проблемы.** В рамках выполнения госбюджетной научной работы РН 0112U005979 по разработке базового курса дисциплины “Основы энерго- и ресурсосбережения” коллективом центра технического творчества студентов “Учтехника”, организованного на энергетическом факультете Украинской инженерно-педагогической академии, создаётся лабораторная база курса, позволяющая проводить не менее 15 специализированных

лабораторных работ по данному направлению [1; 2; 3].

Особенностями данной лаборатории являются комплексный подход к рассмотрению процессов в энергетическом оборудовании и доступность для понимания широкому кругу студентов не только энергетических, но и смежных специальностей. Эффективность работы системы энергосбережения достигается комплексом мероприятий, затрагивающих как тепловую, так и электрическую подсистему, поэтому лаборатория “Основ энерго- и ресурсосбережения” является межотраслевой.

Отличительной особенностью данной лаборатории является создание лабораторных стендов, основанных не на применении реальных промышленных образцов энергосберегающего оборудования, а на лабораторном моделировании процессов в нём. Это обусловлено тем, что создание лаборатории на основе реальных промышленных образцов энергосберегающего оборудования не представляется возможным из-за: высокой стоимости промышленного оборудования, поскольку стоимость единицы продукции (тепловой насос, солнечный коллектор, солнечные батареи) может достигать десятков тысяч долларов США; больших габаритных размеров и объёмов производства и потребления энергии, что делает невозможным их использование в условиях учебных помещений; невозможности моделирования нетиповых режимов работы оборудования и получения экспериментальных данных и т.д.

Исходя из этого, стоит вопрос именно о лабораторном моделировании работы систем энерго- и ресурсосбережения, при котором можно было бы наглядно продемонстрировать эффективность работы таких систем и получить экспериментальные данные в нормальном и внештатном режимах.

В настоящее время созданием лабораторных стендов для системы образования в Украине в промышленных масштабах и приемлемом качестве никто не занимается. Продавцы данного вида продукции в нашей стране предлагают в основном российскую номенклатуру [4; 5; 6]. При этом направление энерго- и ресурсосбережения в номенклатуре продукции поставщиков развито крайне слабо, а условия изготовления и поставки такого оборудования зачастую неприемлемы для украинских учебных заведений.

Задачами лабораторного моделирования технологической системы теплового насоса являются: формирование практических навыков работы с тепловым насосом; формирование умения оценить энергетическую экономическую эффективность работы теплового насоса; закрепление знаний в области теплотехнического оборудования, работа которого основана на изменении агрегатного состояния теплоносителя.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Одним из перспективных направлений в развитии систем теплоснабжения промышленных предприятий и объектов жилищно-коммунальной сферы является применение тепловых насосов (ТН), транспортирующих тепловую энергию земли, грунтовых вод, воздуха в систему отопления. Компании-производители ТН уверяют в экономической эффективности работы таких установок и приводят сравнительные данные потреблённой насосом электроэнергии и транспортированной тепловой энергии. При этом соотношение этих составляющих соотносится как 1 к 3-5, что несомненно

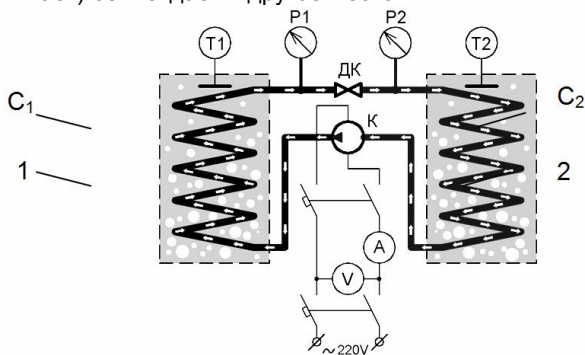
говорит о целесообразности массового использования установок такого типа [7; 8; 9]. Это определило необходимость лабораторного моделирования работы ТН и исследование её эффективности.

Теоретические основы работы ТН (принцип действия которого основан на обратном цикле Карно) достаточно подробно изложены в научной и учебной литературе по основам теплотехники и трансформации тепла [10; 11], а практическая конструкция данного вида энергетического оборудования в зависимости от рабочей среды и компании производителя имеет целый ряд особенностей и различий, что и определяет область его использования, условия работы и энергетическую и экономическую эффективность. Тепловым насосам в последнее время уделяется значительное внимание ведущими специалистами, как проектировщиками, изготовителями, так и эксплуатационным персоналом, что определило необходимость формирования соответствующих знаний и умений у широкого круга специалистов, работающих в области энергоснабжения и энергосбережения и смежных с ними отраслей.

**Цель статьи.** ЦТТС “Учтехника” было поставлено задание разработать принципиальный и рабочий проекты комплексного лабораторного стенда предназначенного для проведения цикла лабораторных работ по тепловому насосу, в частности и комплексным системам энергоснабжения с его использованием вообще, а коллективу исполнителей госбюджетной научной работы РН 0112U005979 создать методическое обеспечение и средства диагностики по указанной тематике лабораторно-практических работ.

Тепловой насос работает по принципу цикла Карно, впервые описанном еще в 1824 году и нашедший практическое описание в 1852 году лордом Кельвином.

На рис. 1 представлена принципиальная схема созданной лабораторной установки, реализующей принцип действия ТН. В соответствии с ним ТН берет тепловую энергию из одного места, переносит (перекачивает) ее и отдает в другое место.



**Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного стенда  
“Исследование эффективности работы теплового насоса”**

1 – испаритель, 2 – конденсатор, С<sub>1</sub> – среда – источник тепла, С<sub>2</sub> – среда отопления, К – компрессор, ДК – дроссельный клапан, Т<sub>1</sub>, Т<sub>2</sub> – термометры, Р<sub>1</sub>, Р<sub>2</sub> – манометры избыточного давления, А – амперметр, V – вольтметр

В первом, внешнем, циркулирует теплоотдатчик  $C_1$  (среда источника тепла непосредственно или теплоноситель его аккумулирующий).

Во втором контуре циркулирует хладагент (вещество, которое испаряется, забирая теплоту теплоотдатчика, и конденсируется, отдавая теплоту теплоприемнику). В этом контуре находятся испаритель 1, конденсатор 2, представляющие теплообменники со средами  $C_1$  и  $C_2$  соответственно, компрессор К, предназначенный для создания циркуляции хладагента во втором контуре, дроссельный клапан ДК, в котором происходит изменение агрегатного состояния хладагента.

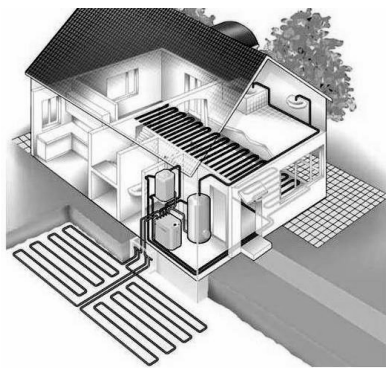
В третьем – теплоприемник (как правило, вода в системах отопления и горячего водоснабжения промышленного или коммунально-бытового объекта теплоснабжения).

В реальных технологических системах геотермальных ТН внешний контур выполнен чаще всего в виде уложенного в землю или в воду горизонтального или вертикального (скважного) трубопровода, в котором циркулирует незамерзающая жидкость – антифриз (рис. 2).

Второй контур является составной частью технологической установки ТН, содержащей помимо двух теплообменников, компрессора и дроссельного клапана, систему управления и противоаварийной автоматики, систему электропитания, приборы учёта и контроля (рис. 3).

Третий контур – это внутренний контур, то есть сама система отопления здания или система горячего водоснабжения.

Рабочий цикл теплового насоса повторяет цикл Карно в обратном порядке. Жидкий хладагент продавливается через дроссель, его давление падает, и он поступает в испаритель, где закипает, отбирая теплоту, поставляемую коллектором из окружающей среды. Газ, в который превратился хладагент, всасывается в компрессор, ужимается и, нагретый, выталкивается в конденсатор. Конденсатор является теплоотдающим узлом теплонасоса: здесь теплота принимается водой в системе отопительного контура.



**Рис. 2. Схема теплоснабжения жилого дома с использованием теплового насоса**



Рис. 3. Внешний вид теплового насоса

а – промышленная установка, б – установка для бытового и мелкого коммунального теплоснабжения

При этом газ охлаждается и конденсируется, чтобы вновь подвергнуться разряжению в расширительном вентиле и вернуться в испаритель. После этого рабочий цикл начинается заново.

Системой за цикл от термостата с более низкой температурой  $T_2$  отнимается количество теплоты  $Q_2$  и отдается термостату с более высокой температурой  $T_1$  количество теплоты  $Q_1$ . Для кругового процесса,  $Q=A$ , но по условию  $Q=Q_2-Q_1<0$ , поэтому  $A<0$  и  $Q_2-Q_1=-A$ , или  $Q_1=Q_2+A$ , т. е. количество теплоты  $Q_1$ , отданное системой источнику теплоты при более высокой температуре  $T_1$  больше количества теплоты  $Q_2$ , полученного от источника теплоты при более низкой температуре  $T_2$ , на величину работы, совершенной над системой. Следовательно, **без совершения работы нельзя отбирать теплоту от менее нагретого тела и отдавать ее более нагретому**. Это утверждение есть не что иное, как второе начало термодинамики в формулировке Клаузиуса. Исходя из этого можно утверждать, что эффективность работы теплового насоса напрямую зависит от коэффициента полезного действия цикла Карно конкретной теплотехнической установки. Иначе говоря, от к.п.д. цикла работы ТН зависит соотношение подведенной механической энергии, расходуемой на перекачку хладагента и изменение его агрегатного состояния и перекачанной тепловой энергии, что и определяет эффективность работы ТН.

Данное соотношение никак нельзя назвать коэффициентом полезного действия, поэтому зачастую его называют “коэффициентом трансформации” ТН и может быть определен по формуле

$$K_{Тнн} = \frac{W_m}{W_{эл}} = \frac{Q_m}{Q_{эл}},$$

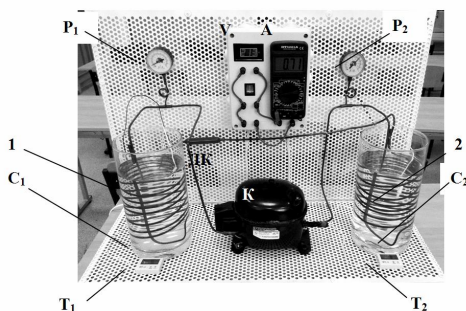
где  $Q_{эл}, W_{эл}$  – тепловая или активная электрическая энергия соответственно, расходуемая на работу компрессора, кВт ч,

$Q_m, W_m$  – тепловая или эквивалентная тепловая энергия, приведенная в единицы измерения электроэнергии соответственно, полученная на выходе конденсатора, Дж.

Для большей части промышленно выпускаемых ТН данный коэффициент имеет значение от 3 до 5 в энергетическом эквиваленте. Однако при оценке

экономической эффективности работы ТН следует учитывать разницу в величине рыночных тарифов на эквивалентные объёмы электрической и тепловой энергии, так как на работу ТН расходуется электроэнергия, а полезно потреблённой энергией является тепловая. Рассчитав энергетическую эффективность работы одного и того же ТН в электрическом и тепловом эквивалентах и умножив на соответствующие рыночные тарифы на эти виды энергии, получим различные показатели. Поэтому экономическую эффективность следует определять с учётом существующих тарифов на тепловую и электрическую энергию конкретном регионе.

Моделирование процессов в контурах ТН производилось с использованием типовых комплектующих холодильной техники. Схема лабораторного стенда позволяет повторять цикл работы теплового насоса и получать основные показатели его работы. Внешний вид стенда в металле представлен на рис.4.



**Рис. 4. Лабораторный стенд “Исследование эффективности работы теплового насоса”**

1 – испаритель, 2 – конденсатор,  $C_1$  – среда – источник тепла,  $C_2$  – среда отопления, К – компрессор, ДК – дроссельный клапан,  $T_1, T_2$  – термометры,  $P_1, P_2$  – манометры избыточного давления, А – амперметр, V – вольтметр

Смысл лабораторных испытаний состоит в следующем. В начале работы в емкости  $C_1$  и  $C_2$  заливается вода одинаковой температуры. Затем включается компрессор, который перекачивает хладагент второго контура, что приводит к охлаждению испарителя 1 и нагреванию конденсатора 2. Вследствие этого температура воды в емкостях будет изменяться пропорционально количеству перекачанной тепловой энергии от среды  $C_1$  (вода емкости испарителя) к среде  $C_2$  (вода емкости конденсатора). Зная величину изменения температуры каждой из сред  $\Delta t$ , можно определить количество теплоты  $Q$ , транспортированной из среды 1 в среду 2, по формуле

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta t,$$

где  $m$  – масса теплоносителя, кг;

$C$  – теплоёмкость теплоносителя (для воды 4170Дж/к К);

$\Delta t$  – величина изменения температуры среды, К.

Измерения проводят с определённым временным интервалом (при испытаниях стенда интервал принимался равным 2 мин.). Это позволит иметь

данные о динамике изменения температур сред, давления хладагента в испарителе и конденсаторе, потреблённой компрессором электроэнергии и рассчитать экономическую эффективность работы теплового насоса по формуле

$$\Xi = Q_K \cdot C_{mэ} - W_K \cdot C_{ээ},$$

где  $Q_K$  – тепловая энергия, переданная от конденсатора к среде  $C_2$ , кДж;

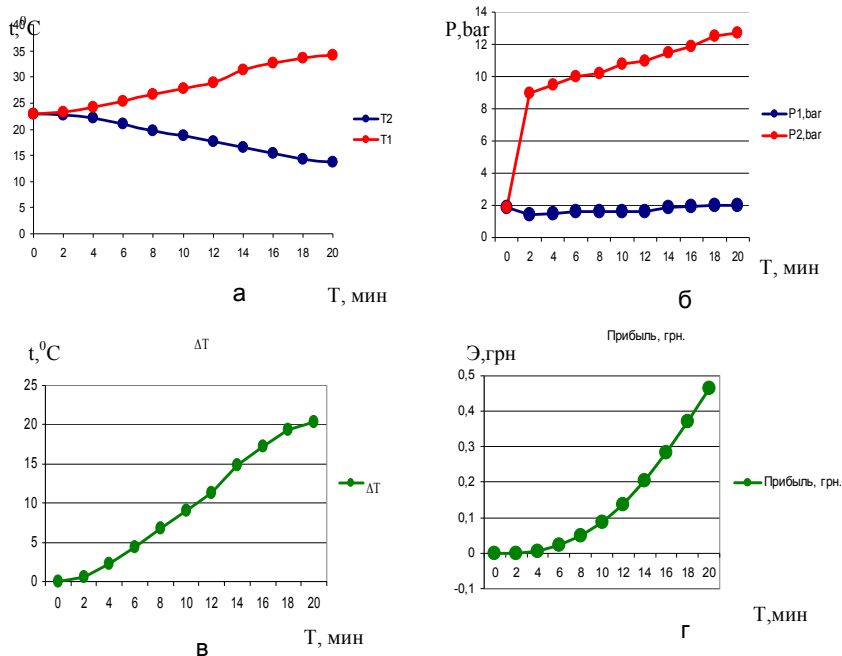
$C_{mэ}$  – коммерческий тариф на тепловую энергию в конкретном регионе для конкретного потребителя, грн кДж;

$W_K$  – количество электроэнергии, затраченное на работу компрессора ТН, кВт ч;

$C_{ээ}$  – коммерческий тариф на электроэнергию в конкретном регионе для конкретного потребителя, грн кВт ч.

При испытаниях на рассмотренном в статье лабораторном стенде была достигнута экономическая эффективность в размере 0,46 грн. в течение 20 минут, что в пересчёте на суточный временной интервал составит 33,54 грн., а в пересчёте на время годового отопительного сезона составит 6036,6 грн.

Графики изменения основных величин за 20-минутный цикл работы стенда приведены на рис. 5



**Рис. 5. Изменение основных параметров ТН при его работе**

а – температуры сред, б – давления хладагента в испарителе и конденсаторе, в – динамика изменения температуры среды системы отопления  $C_2$ , г – экономическая эффективность работы ТН

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.**

Основываясь на принципе действия ТН и основных законах теплотехники, в лабораторных условиях был смоделирован процесс работы ТН, получены его основные технические показатели, что позволило определить экономическую эффективность работы данного вида энергосберегающего оборудования.

Работа проводилась с активным привлечением студентов энергетического факультета УИПА, что значительно улучшило их уровень теоретической и практической подготовки по данной тематике.

Рассмотренный лабораторный стенд является универсальным и может быть в дальнейшем использован для работы в имитационных моделях сложных систем энергоснабжения и энергосбережения, реализованных в межотраслевой лаборатории по дисциплине “Основы энерго- и ресурсосбережения”.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Канюк Г. І. Проект створення системи підготовки та підвищення кваліфікації викладачів курсів “Основи енерго- та ресурсозбереження на виробництві, у комунальному господарстві, у сфері послуг та побуту” / Г. І. Канюк, О. Е. Коваленко, М. І. Лазарев, В. Ф. Без’язичний, Т. М. Пугачова // Проблеми інженерно-педагогічної освіти. – 2013. – №38-39. – С. 13-23.

2. Васюченко П. В. Повышение компетентности выпускника ВУЗа за счёт развития системы технического творчества студентов / П. В. Васюченко, А. М. Чернюк, Н. А. Несторук // Наукова скарбниця освіти Донеччини. – 2013. – №1 (14). – С. 9-14

3. Канюк Г. І. Концепція створення лабораторної бази навчального курсу “Основи енерго- і ресурсозберігання” / Г. І. Канюк, А. М. Чернюк, В. Ф. Без’язичний, Т. М. Пугачова, В. С. Ерёменко // Збірник наукових праць Бердянського державного педагогічного університету. Педагогічні науки. 2014. – №4. – С. 59-65.

4. ООО “ИПЦ “Учебная техника” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electrolab.ru/>

5. Наглядные учебные пособия, учебное оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://td-school.ru/>

6. “Учтех-Профи”: учебное оборудование, техника и наглядные пособия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://labstand.ru/>

7. Васильев Г. П. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии: ОАО “ИНСОЛАР-ИНВЕСТ” / Г. П. Васильев, Л. В. Хрустачев. – М., 2001. – С.12-17.

8. Быков А. В. Холодильные машины и тепловые насосы / А. В. Быков, И. М. Калнинь. – М. : Агропромиздат, 1988. – 287 с.

9. Гершкович В. Ф. От простого погодного регулятора до нулевого теплопотребления. Этапы модернизации теплоснабжения жилого дома / В. Ф. Гершкович. – Энергосвет, 2010. – №2. – С. 22-25.

10. Ляшков В. И. Теоретические основы теплотехники / В. И. Ляшков. – М. : “Издательство машиностроение – 1”, 2002 – 258 с.



11. Соколов Е. Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения : учеб. пособ. для вузов / Е. Я. Соколов, В. М. Бродянский. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергоиздат, 1981. – 320 с.