

УДК 621.436

Н. Г. КУЦЬ, канд. техн. наук, доц. Луцкий НТУ**ТРАНСПОРТ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ С ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ**

Разработана физико-математическая модель работы сложного открытого энергетического комплекса с применением теплового насоса. Показано, что наиболее эффективная работа теплового насоса реализуется при минимальной энергии активации и в резонансных условиях. Обоснован принцип работы парового двигателя в качестве теплового насоса. Показано, что вентилятор, компрессор, турбина, электромагнитный мотор-генератор и намагниченный феррит в продольном резонансе являются тепловыми насосами.

Ключевые слова: тепловой двигатель, электромагнитный двигатель, тепловой насос, транспорт.

Введение. В связи с ограниченностью энергоресурсов в настоящее время в передовых странах мира интенсивно ведутся разработки новых более экономичных преобразователей различных видов энергии со значительным уменьшением потерь. При этом ищут пути замены углеводородных топлив на другие виды топлива (ядерные источники, вода и др.). Создаются устройства, которые работают на возобновляемых источниках энергии. Максимально используются природные источники энергии (солнце, ветер, реки). Особое значение приобретает применение на всех видах транспорта тепловых насосов.

Развитие современного состояния энергетической базы на транспорте осуществляется по следующим направлениям [1,2]:

1. Двигатели на всех видах транспорта должны быть мощными и при этом обладать минимальной массой и минимальными габаритами.
2. Преобразование одного вида энергии в другой ее вид должно происходить с максимальным коэффициентом преобразования.
3. Экология окружающей среды не должна нарушаться.
4. Использование новых физических принципов преобразования энергий.

Анализ исследований. 1. Наиболее мощными, но с максимальными массогабаритными характеристиками являются поршневые тепловые двигатели. В настоящее время разработаны и внедряются на транспорте роторные и газотурбинные двигатели, у которых удельные мощности на единицу массы почти на порядок выше, чем в поршневых двигателях. Однако и это не предел. Если перейти от тепловых двигателей к электромагнитным мотор-генераторам, оснащенных тепловыми насосами, то удельные мощности можно поднять еще на порядок и более.

2. Применение тепловых двигателей на транспорте не позволяет получить коэффициент полезного действия более 35-45%. Во всех видах тепловых двигателей преобразуется в механическую работу только одна степень свободы поступательной тепловой энергии, что не позволяет получать КПД более 33%. Если применить роторы в качестве лопастей в турбине, то возможно преобразовывать две степени свободы поступательной тепловой энергии в механическую работу, и получать при этом предельный КПД 67%. Потери энергии, получаемой после полного сжигания топлива в тепловых двигателях, возникают вследствие следующих причин: 1 – разогрев корпуса двигателя в процессе конвективного теплообмена горючих газов при взаимодействии с внутренней поверхностью камеры сгорания; 2 – выброс разогретых горючих газов

© Н. Г. Куць, 2014

через выхлопную трубу в окружающую атмосферу; 3 – на обеспечение условий и организацию комфорта пассажирам транспортного средства.

3. Выхлопные газы после сжигания углеводородного топлива в тепловых, роторных и газотурбинных (особенно 5-го поколения) двигателях высокотоксичные вследствие образования NO_x . Чтобы снизить загрязнение окружающей среды, уменьшают температуру рабочего газа путем сокращения расхода топлива, а это приводит к уменьшению мощности двигателя, что не желательно. Поэтому предложено использовать воду в качестве топлива или чистый водород с кислородом воздуха. Более радикальный способ – это отказаться от углеводородного топлива и заменить тепловые двигатели на транспорте электродвигателями. Особенно перспективно применить на транспорте воздушные тепловые насосы [2,3].

4. Интенсивно ведутся поиски замены углеводородного на альтернативные виды топлива. Это, прежде всего, биотопливо, рапсовое и подсолнечное масло, вода, водород с кислородом или воздухом, тепло окружающего воздуха и, как более эффективное средство – переход на электротягу с применением воздушных тепловых насосов.

По всем четырем направлениям важно получить коэффициент преобразования больше единицы. Для этого весь бортовой энергоблок необходимо превратить в открытую систему, когда при обеспечении соответствующих условий вследствие взаимодействия с другими энергосистемами возникает дополнительный канал обмена энергиями. В настоящее время убедительно доказано, что тепловые насосы позволяют получать коэффициент преобразования одного вида энергии в другой больше единицы. Важно этот принцип реализовать на транспортных средствах. В этой связи создание гибридных энергосистем следует рассматривать как переходной период перевода всех транспортных средств на электротягу с использованием тепловых насосов.

Постановка проблемы. Провести анализ современного состояния, в каком направлении осуществляется развитие бортовых энергетических комплексов в транспорте, и наметить возможные пути совершенствования таких комплексов. Поставленная цель ставит следующие задачи: - выяснить на какой теоретической базе создаются тепловые и электрические моторы и генераторы; - разработать теоретическую базу, которая бы позволила осуществить компьютерное моделирование принципа работы и условий эксплуатации того или иного двигателя на новых физических принципах; - разработать теоретические основы работы тепловых двигателей и электрических мотор-генераторов; - рассмотреть возможные пути использования тепловых насосов в бортовых энергокомплексах транспортных средств.

Основная часть. Тепловой насос – это устройство, которое принудительно осуществляет переход тепловой энергии от более низкого, к более высокому энергетическому состоянию не только тепловой энергии, но и с преобразованием тепла в другие виды энергий путем создания такой разности энергетических состояний, когда самопроизвольно происходит переход энергии от одной энергосистемы к другой. Разность энергетических состояний создается естественным и искусственным путем.

На транспорте бортовая энергетика формируется тепловыми и электрическими двигателями. Каждый двигатель работает на разности энергетических уровней. В случае тепловых двигателей – это разность тепловых энергий, обусловленная наличием разных температур, а в случае электрических двигателей – это разность электрических потенциалов. Движущийся транспорт взаимодействует с окружающей средой и поэтому является открытой энергосистемой. Для открытых связанных энергосистем

следует учитывать такое взаимодействие, и использовать его для расширения возможностей бортовой энергетики. Схематически работа взаимодействующих энергосистем показана на рис. 1.

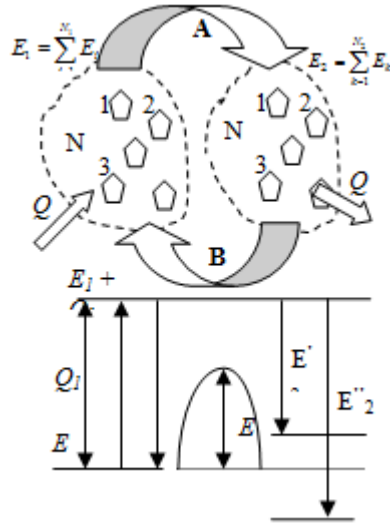


Рисунок 1 – Схематическое изображение превращения энергии в открытой энергосистеме

На этой схеме две сложные независимые энергетические системы, в составе которых содержится N_1 и N_2 независимых энергетических подсистем, взаимодействуют между собой. Пусть первой системе сообщается энергия Q_1 , величина которой больше энергии активации E_a . Тогда возникнет неравновесное состояние с энергией $(E_1 + Q_1)$ и обе системы начнут взаимодействовать друг с другом. Возникнет канал перехода энергии от первой системы ко второй по траектории, а, работа:

$$A = E_1 + Q_1 - E \quad (1)$$

Если вторая система находилась в состоянии E'_2 , то $E_1 > E_2$ и коэффициент передачи энергии по каналу А, определяемый как отношение полученной работы к затраченной, определится:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{E'_2 - E_1}{Q_1} \geq 1 \quad (2)$$

Вторая энергосистема приобретает от первой дополнительную энергию, и тогда коэффициент по формуле (2) больше или равен единице и он уже -- коэффициентом преобразования энергии в открытой системе. Если же вторая система находилась в состоянии $E''_2 > E_1$, то $\eta \leq 1$. В этом случае энергосистемы следует рассматривать как совместно замкнутые или консервативные. Для такой обобщенной системы η меньше или равен единице и является коэффициентом полезного действия, и применим закон сохранения энергии. При возникновении кругового процесса, часть энергии от второй системы к первой будет переходить по траектории В и работа равна $A = Q_1 - Q_2$. Когда обе энергосистемы открытые и обладают колебательными свойствами с собственной частотой колебаний ω_0 , то такую энергосистему можно привести в

резонансное состояние, используя периодическое возбуждение с малой энергией. Если возмущение осуществляется периодической функцией $Q = Q_0 \cos(\omega t)$, то энергия, приобретаемая открытой колебательной системой N_I , равна [8]:

$$Q_1 = \frac{CQ_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \quad (3)$$

где C – размерный коэффициент пропорциональности.

В резонансе $Q_1 = CQ_0 / 2\beta\omega_0$ при коэффициенте затухания $\beta \rightarrow 0$ получаем $Q_1 \rightarrow \infty$. За некоторое время Q_1 достигнет энергии активации E_a . Работа, которую может совершить объединенная система, равна разности $E_1 - E_2$, а коэффициент преобразования энергий в этом случае равен:

$$\eta = 1 + \frac{E_1 - E_2}{E_a}. \quad (4)$$

Получается, что при $E_a \rightarrow 0$ коэффициент преобразования стремится к бесконечности. Таким образом, используя резонансные свойства открытых систем, коэффициент передачи энергий от одной энергосистемы ко второй может быть получен максимальный. Открытые резонансные системы имеют наилучшие возможности превращения энергий разных видов в сложных энергетических комплексах. В нестационарных условиях передача энергий по траекториям А и В (рис.1) изменяются со временем. Общий подход описать проблематично, поэтому в каждом конкретном случае необходимо разрабатывать свой подход и свою систему уравнений.

При наличии естественной разности энергетических состояний окружающая среда является активной и возникает канал перекачки энергии от окружающей среды к открытой системе в виде энергии Q_I . Коэффициент взаимного преобразования энергий разных видов регулируется и возможно реализовать взрывной механизм перекачки энергии [9]. Энергетическая открытая система с активной окружающей средой реализуется в естественных условиях при работе гидроэлектростанций, в ветроэнергетике, в процессе преобразования солнечной энергии, в шаровой молнии, а искусственно – при работе кондиционеров, воздушных винтов, вентиляторов, компрессоров, турбин и полетах самолетов.

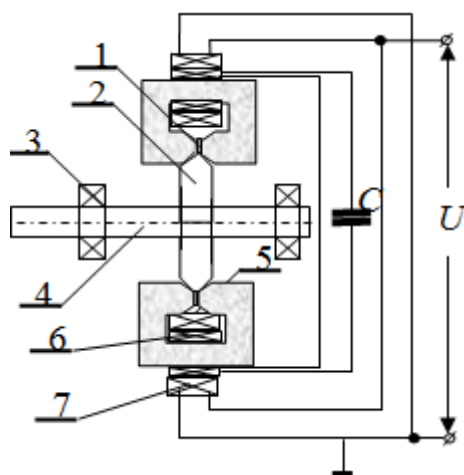
Особый интерес представляет открытая система для получения избыточной энергии путем организации работы теплового насоса. При работе теплового насоса осуществляются энергообменные процессы в разных контактах: - теплоперенос от нагретого твердого тела к твердому телу; от жидкости к твердому телу; от газа к жидкости и от газа к твердому телу; - теплоперенос при испарении жидкости; - теплоперенос при конденсации. Для каждого типа насоса вначале определяются тепловые контакты, а затем производится расчет теплопереноса во всех контактах.

В автомобильном транспорте наметилась тенденция применения теплового насоса не только для охлаждения работающего двигателя, но и для повышения температуры в зимних условиях [11] для снятия налета льда на наружном теплообменнике автомобиля, работающего на топливных элементах. Более эффективный способ охлаждения работающего теплового двигателя предложен в

работе [2], в которой рассмотрено применение двух тепловых насосов на основе двигателей Стирлинга для охлаждения корпуса двигателя и выхлопных газов.

Паровые двигатели также можно использовать в качестве тепловых насосов для охлаждения корпуса двигателя. Двухцилиндровый двухтактный паровой двигатель, в котором цилиндры работают в противофазе, выполняет функцию теплового насоса. В тепловом контакте с устройством водяного охлаждения находится испарительная камера, частично заполнена жидкостью с температурой испарения несколько меньше температуры корпуса работающего теплового двигателя. В качестве хладагента в тепловых двигателях можно применять сероуглерод или воду. Под действием избыточного давления, создаваемого насыщенными парами, поршень двигается и совершает работу. Чтобы мощность разогрева корпуса полностью скомпенсировать, необходимо применить балластный объем, чтобы при адиабатическом расширении температура не превышала порога, определяемой температурой плавления применяемого рабочего вещества в твердом состоянии.

Весьма перспективным является применение резонансного электрического мотор-генератора магнитодинамического типа в качестве теплового насоса, принципиальная схема которого приведена на рис.2. Такой мотор-генератор преобразует механическую энергию в электрическую в резонансном режиме и при этом реализуются большие мощности, и получает избыточную энергию вследствие конвективного теплообмена с окружающей средой.



1 – постоянный магнит; 2 – металлический диск ротора; 3 – подшипник; 4 – вал; 5 – сердечник; 6 – катушка индуктивности; 7 – обмотка трансформатора.

Рисунок 2 – Принципиальная схема резонансного магнитодинамического генератора переменного тока

Ротор представляет собой, металлический вал 4, на котором крепится металлический диск 2. На металлическом диске 2 по внешнему радиусу установлены плоские постоянные магниты 1. Форма и толщина плоского магнита может быть разной. Число постоянных магнитов должно быть четным и определяется механической мощностью, которую необходимо преобразовать в электрическую энергию, когда такое устройство работает как генератор. Металлический диск с постоянными магнитами вращается по часовой или против часовой стрелки, и при этом в индуктивностях L наводится ЭДС индукции. Число индукционных катушек должно

быть четным по отношению к числу постоянных магнитов. Сердечники катушек 5 имеют зазор, почти равный толщине постоянных магнитов. Постоянные магниты используются на основе ферритов-гранатов, которые расположены по окружности диска 2. Катушки индуктивности со своей электроемкостью и вращающийся металлический диск представляют собой замкнутую резонансную энергосистему. Мощность, вырабатываемая генератором, снимается с резонансного контура с помощью повышающего трансформатора 7. Выходная мощность определяется параметрами механического источника. По заданной выходной мощности и выходному напряжению оптимизируется работа магнитодинамического генератора путем выбора величины результирующей индуктивности, которая зависит от магнитных свойств ферритового сердечника 5, количества витков в намотке катушек индуктивности 6, количества магнитных катушек индуктивности и размеров сердечника каждой из катушек.

В резонансных условиях параллельный RLC-контур представляет собой замкнутую энергетическую систему по отношению к внешнему источнику переменного напряжения. Применительно к такой системе, в соответствии с законом превращения энергии, первое начало термодинамики, а именно:

$$dU_T + dA = 0 \quad (5)$$

Следовательно, в резонансных условиях энергия, запасенная в колебательном контуре, расходуется на все виды работ за счет внутренней энергии. Если нет притока энергии извне, то переменные потери на активном сопротивлении компенсируются запасенной электрической энергией в контуре, а постоянные потери в сердечнике, за счет гистерезиса зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля, т.е., компенсируются за счет тепловой энергии, запасенной в магнитном сердечнике.

Таким образом, в резонансных условиях параллельный колебательный контур является открытой системой по отношению к теплообмену с окружающей средой, и выполняет роль воздушного теплового насоса. Кроме этого, такой резонансный контур является активной магнитной антенной, воспринимающей магнитные волны¹ и электромагнитные волны из окружающей среды.

Такая резонансная система потери на активном сопротивлении и при наличии существенного отбора энергии из системы на источники потребления восполняет свои потери путем конвективного теплообмена с окружающей средой и является генератором свободной энергии [12].

При наложении внешнего магнитного поля на феррит встроенные магнитные моменты кластеров, молекул, атомов выстраиваются вдоль направления приложенного магнитного поля. Только орбитальное движение валентных электронов свободных достаточно крупных частиц (молекул, кластеров) внутри твердого тела влияют на характер формирования внутреннего магнитного поля под действием внешнего поля. Свободные частицы, обладающие встроенным магнитным дипольным моментом, во внешнем магнитном поле будут испытывать со стороны поля действие момента силы:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}]. \quad (6)$$

В результате свободные атомы, молекулы или кластеры, развернутся в магнитном поле так, что их магнитные моменты совпадут с направлением внешнего

магнитного поля. При распространении электромагнитной волны вдоль намагниченного феррита по мере приближения частоты падающей волны к частоте свободной прецессии феррита амплитуда положительной волны должна стремиться к бесконечности. На самом деле она достигает своего максимального значения. Намагниченный феррит в металлической оболочке является открытой антенной системой, которая из окружающей среды черпает энергию магнитного поля. Количество энергии определяется ее геометрическими параметрами. Это свойство феррита находит применение в гибридных энергокомплексах [2,3].

Если создать внутри феррита магнитное поле, обеспечивающего продольный резонанс, и поместить такую систему в металлическую оболочку, то электрическая составляющая падающей волны внутрь не пройдет, а магнитная составляющая беспрепятственно войдет и поглотится ферритом. В результате магнитная составляющая электромагнитной волны резко увеличит амплитуду волны внутри феррита и при этом возрастет ее энергия. Поток энергии волны из окружающей среды:

$$P = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} H_{cp}^2 G + \Delta P_{cp}. \quad (7)$$

Здесь $\sqrt{\mu/\varepsilon}$ - сопротивление феррита распространению электромагнитных волн; H_{cp} - амплитуда переменной составляющей магнитного поля окружающей среды (магнетизм Земли); G - коэффициент усиления ферритовой антенны и ΔP_{cp} - поток магнитных волн из космоса и внутренних искусственных источников магнитных волн.

Очевидно, что рост энергии волны должен компенсироваться внутренней энергией, заключенной в феррите. Поэтому температура феррита должна падать, что приведет к конвективному теплообмену с окружающей средой. Если окружающая среда воздух, то конвективный теплообмен составит:

$$\dot{Q} = \frac{1}{4} \theta v_T n_{cp} k_B \Delta T, \quad (8)$$

где $\theta = \frac{4Mm}{(M+m)^2}$ - доля передаваемой энергии при упругом столкновении молекул

воздуха со сводными молекулами или с кластерами феррита; $v_T = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$ -

среднехаотическая скорость молекул воздуха; n_{cp} - концентрация молекул воздуха окружающей среды; ΔT - разность температур между ферритом и окружающей средой. В условиях термодинамического равновесия:

$$\Delta T = \frac{4P}{\theta v_T n_{cp} k_B}. \quad (9)$$

Следовательно, в резонансных условиях охлаждение феррита достаточно заметное. Тогда такое устройство представляет собой вихревой тепловой насос [13].

Выводы. Такого вида электромагнитный тепловой насос может быть использован на любом виде транспорта. Он обладает достаточно малыми массогабаритными характеристиками, а теплообмен с окружающей средой осуществляется всей площадью движущегося транспортного средства с набегающим потоком воздуха. Таким образом, внедрение тепловых насосов на всех видах транспорта является важнейшей задачей современного развития транспортных энергетических комплексов.

Список литературы: 1. *Гречихин Л. И.* Двигатели внутреннего сгорания. Физические основы технической диагностики и оптимального управления. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 270 с. 2. *Гречихин Л.И., Куць Н.Г.* Энергетические комплексы на транспорте – Мн.: «Право и экономика», 2013. – 258 с. 3. *Grechihin L. I., Kuts N.G.* Heat Pump with the Mobius Screw / Proceedings: The fifth world Congress “Aviation in the XXI-st century” September 25-27, 2012. – Kyiv: NAU. 2012. V.1, P. 1.3.22 – 1.3.32. 4. *Амерханов Р.А.* Тепловые насосы. – М: Энергоатомиздат, 2005. – 160 с. 5. *Мазуров О.К., Кузнецов Н.В., Квакин С.Д.* Тепловые насосы и их эффективность для целей теплоснабжения и улучшения экологической обстановки. / Изв. Рост. гос. строит. у-та. 2006. № 10. С. 266-273. 6. *Васильев Г.П.* Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. – М.: «Красная звезда», 2006. – 220 с. 7. *Володин В.И.* Влияние внутренних и внешних факторов на эффективность тепловых насосов. Препр. ИПЭ-22. – Мн: ИПЭАНБ, 1996. – 24 с. 8. *Гречихин Л. И.* Общие основы формирования и превращения энергетических полей разной природы / Известия ВУЗ и энергетических объединений СНГ. «Энергетика», 2006, № 3, с. 32-39. 9. *Латцевич А.А., Гречихин Л.И., Куць Н.Г.* Энергетическая база беспилотных летательных аппаратов. / Энергетика. Известия ВУЗ и энергетических объединений СНГ. - 2011, № 3. С. 64-78. 10. *Kim Sung Chul, Kim Min Soo, Hwang In Chul, Lim Tae Won.* Performance evaluation of CO₂ heat pump system for full cell vehicles considering the heat exchanger arrangements. / Ins. J. Refrig. 2007. 30. № 7. P. 1195-1206. 11. *Wang Zhiyi, Wang Xinmin, Dong Zhiming.* Defrost improvement by heat pump refrigerant charge compensating. / Appl. Energy 2008 85. № 11. P. 1050-1059. 12. *Роцин В. В., Годин С. М.* Экспериментальное исследование физических эффектов в динамической магнитной системе. // Международный конгресс – 2000. С.-Петербург, 2000, Т.1, №1, с.202-205. 13. *Бигель А. С., Гречихин Л.И., Рогожинский Ю.А., Шумский И. П.* Электромагнитный тепловой насос / Аграрная энергетика в XXI-м веке: Материалы Международной научно-технической конференции. (Минск, 25-26 сентября 2001 г.). Под ред. В. С. Котова. – Мн.: УП «Технопринт», 2001.

Bibliography (transliterated): 1. *Grechikhin L.I.* Internal combustion engines. Physical basis of technical diagnostics and optimal control. - Mn.: Navuka i tehnik, 1995. - 270. 2. *Grechikhin L.I., N.G. Kutz.* Energy complexes in transport - Mn. " Law and Economics ", 2013. - 258 p. 3. *Grechihin L.I., Kuts N.G.* Heat Pump with the Mobius Screw / Proceedings: The fifth world Congress "Aviation in the XXI-st century" September 25-27, 2012. - Kyiv: NAU. 2012 . V.1, P. 1.3.22 - 1.3.32. 4. *Amerhanov RA* Heat pumps. - M Energoatomizdat 2005. - 160. 5. *Mazur D.C., Kuznetsov N.V., S.D. Kvakina* Heat pumps and their efficiency for heating purposes and to improve the environmental situation. / Math. Growth. Reg. builds. in -ta . 2006. Number 10. Pp. 266-273. 6. *Vasiliev G.P.* Teplohladosnabzhenie buildings and structures using low-grade heat energy of the surface layers of the Earth. - M.: "Red Star ", 2006. - 220. 7. *Volodin V.I.* The influence of internal and external factors on the efficiency of

heat pumps. Preprint. IPE -22. - Madeline: IPEANB, 1996. - 24 s. **8.** *Grechikhin L.I.* General principles of formation and transformation of energy fields of different nature / News University and the CIS energy associations. "Energy", 2006, № 3, p. 32-39. **9.** *Laptsevich A.A., Grechikhin L.I., N.G. Kutz* Power base of UAVs. / Energy. Proceedings of the University and the CIS energy associations. - 2011, № 3. Pp. 64-78. **10.** Kim Sung Chul, Kim Min Soo, Hwang In Chul, Lim Tae Won. Performance evaluation of CO2 heat pump system for full cell vehicles considering the heat exchanger arrangements. / Ins. J. Refrig. 2007. 30. Number 7. P. 1195-1206. **11.** *Wang Zhiyi, Wang Xinmin, Dong Zhiming.* Defrost improvement by heat pump refrigerant charge compensating. / Appl. Energy 2008 85. Number 11. P. 1050-1059. **12.** *Roschin V.V., Godin S.M.* Experimental study of physical effects in dynamic magnetic system. // International Congress - 2000. St. Petersburg, 2000, Vol.1, № 1, p.202-205. **13.** *Biegel A.S., Grechikhin L.I., Rogozhinskiy Y.A., Shumsky I.P.* Electromagnetic heat pump / Agrarian power in the twenty-first century: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. (Minsk, 25-26 September 2001). Ed. *V.S. Kotova*. - Mn.: UE "Tekhnoprint", 2001.

Надійшла (received) 05.03.2014