

## Электрогидродинамический испарительно-конденсационный холодильник

Савин И.К.<sup>1</sup>

Петрозаводский государственный университет

Рассмотрена физика электрогидродинамического (ЭГД) холодильного эффекта, показана возможность его реализации в техническом устройстве, определены основные характеристики ЭГД-холодильника, представлена методика расчета величины холодильного эффекта и намечены пути его совершенствования.

**Ключевые слова:** испарение, конденсация, электрогидродинамика, холодильник.

Одним из направлений, обеспечивающих энергосбережение, является разработка и создание технологий и технических устройств, работа которых основывается на новых принципах и физических явлениях. В частности, основным потребителем электроэнергии в быту (за исключением электроплит) является холодильник. Современные агрегаты в сутки потребляют электроэнергию в пределах  $5,4 - 7,2 \cdot 10^6$  Дж ( $1,5-2,0$  кВт·час). Для того, чтобы потратить это же количество энергии на освещение, необходима непрерывная работа 5 ламп накаливания по 60 Вт каждая в течение 6 часов. Таким образом, проблема поиска новых принципов охлаждения и совершенствования традиционных весьма актуальна. В связи с этим рассмотрим возможность реализации специфических электрогидродинамических (ЭГД) эффектов в системах охлаждения.

Одна из первых попыток получить холодильный эффект была предпринята Янтовским Е.И. [1], для чего в однофазную жидкую среду в межэлектродный зазор вводились частички сегнетоэлектрика, имеющего относительную диэлектрическую проницаемость более 1000. Однако при подаче высокого напряжения частицы замыкали электроды, что препятствовало использованию повышенных значений напряжений и, как следствие, были получены пренебрежимо малые холодильные эффекты.

Использование двухфазной системы, имеющей границу раздела фаз пар-жидкость, позволяет устранить недостатки, имеющие место в [1], и достигнуть ощутимых результатов в эффекте генерации холода.

На рис. 1 показана конструкция такого ЭГД - испарительно-конденсационного холодильника (ИКХ), использующего испарительно-конденсационный цикл, состоящего из корпуса, частично заполненного теплоносителем 1. Объем охлаждения 7 находится в зоне испарения 2. Пар теплоносителя поступает в

зону конденсации 4, где граница раздела фаз пар-жидкость деформируется электрическим полем, создаваемым между теплоотдающей пластиной 5 и высоковольтным электродом 3, подключенным к источнику высокого напряжения. Теплоотдающая пластина 5 заземлена через микроамперметр 6. Работа данной ЭГД-ИКХ основана на экспериментально обнаруженной зависимости смещения фазового равновесия при фазовом превращении посредством деформации границы раздела фаз пар-жидкость электрическим полем [2, 3], которое происходит в сторону больших температур. Например, для воды оно составляет  $0,7-1,0$  К, для гексана - до 14 К, а для хладона -113 - до 16 К.

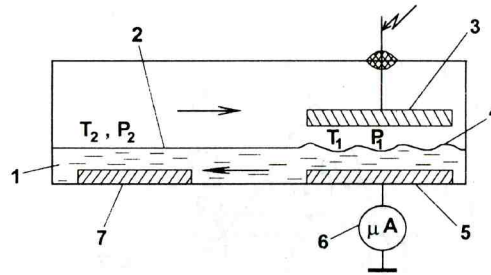


Рис. 1. Схема ЭГД-холодильника

Это смещение фазового равновесия позволяет конденсировать пар в зоне конденсации при более высокой температуре и отдавать тепло в окружающую среду, имеющую в начальный момент времени одинаковую температуру с охлаждаемым объектом ( $T_0$ ). ЭГД-ИКХ работает следующим образом: часть межфазной поверхности подвергается действию внешнего поля; при этом температура равновесия этой части системы отклоняется от начальной  $T_0$  и принимает значение  $T_1$  ( $T_1 > T_0$ ). Напряженность внешнего поля в этом случае должна превышать напряженность, при которой возникает устойчивая деформация поверхности раздела [4, 5].

Возникшая вследствие изменения условия равновесия разность температур  $T_1 - T_0$  служит движущей силой теплообмена между частью системы, подвергнутой воздействию поля, и окружающей средой с температурой  $T_0$ . Отвод тепла от системы является причиной конденсации пара в зоне 4, приток которого осуществляется за счет испарения с других, не деформированных, участков поверхности раздела, понижая тем самым температуру испарителя 2 до температуры  $T_2$  ( $T_2 < T_0$ ). На рис.2 в T-S диаграмме представлен термодинамический цикл ЭГД-ИКХ (S-энтропия). Воздействие электрического поля сопровождается деформацией границы раздела. При этом, если роль горбов подавляется сторонним фактором, то смещение равновесия сопровождается изотермическим снижением давления, соответствующего данной температуре. В этой связи в электрическом поле линия сухого насыщения пара смещается в правую сторону относительно своего нормального положения, увеличивая теплоту фазового перехода, о чем говорилось в [6]. Жидкость при температуре  $T_2$  испаряется (процесс 4 -

<sup>1</sup> Автор - профессор кафедры тяговых машин  
© И.К.Савин, 1996

1) за счет тепла, отбираемого из окружающей среды (либо за счет уменьшения внутренней энергии). Пар, двигаясь к зоне конденсации, снижает давление и повышает температуру, изменяя свое состояние от т.1 до т.2 (процесс 1-2). Существование этого процесса возможно вследствие изменения условий равновесия над деформированной поверхностью раздела. Поскольку температура этой части системы  $T_1$  (конденсатора) оказывается выше температуры окружающей среды  $T_0$ , то вследствие теплообмена имеет место процесс конденсации (2-3) и охлаждения жидкого теплоносителя (3-4) с последующим его возвратом к состоянию т.4. Запуск ЭГД-ИКХ на рис. 2 не показан.

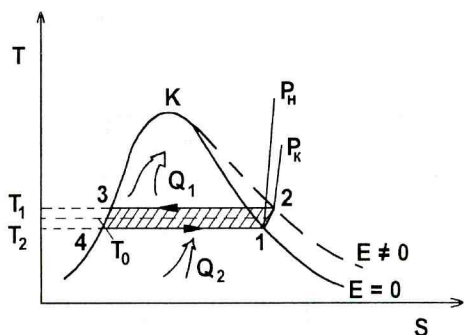


Рис.2. Термодинамический цикл ЭГД-ИКХ в T-S диаграмме

Холодильный эффект реализован на ячейке, выполненной из винипластовой трубы диаметром 24 мм и длиной 200 мм. Испаритель 7 (см. рис.1) — медная фольга размером 15 x 20 x 0,1 мм, а конденсатор 5 — 15 x 40 x 0,1 мм. В зоне конденсации 4 у заземленной поверхности 5 размещен высоковольтный электрод 3, состоящий из 4 проводов диаметром 1 мм и расположенный на расстоянии 4 мм от поверхности 5. Для визуальных наблюдений с торцов располагались окна из оргстекла. В качестве теплоносителя использовался хладон-113; труба герметизировалась.

Измерялись разность температур между охлаждаемым объектом 7 и конденсатором 5, ток процесса, температура испарителя и конденсатора. При подаче высоковольтного потенциала от 6 до 10 кВ на поверхности теплоносителя (см. рис.1) образовались заметные холмы. Между границей раздела и высоковольтным электродом отмечалось возникновение струек, интенсивность которых менялась при варьировании прикладываемого потенциала. При этом ток, протекающий через ячейку в указанном диапазоне потенциалов, составлял 0,02 - 1,0 мкА.

При подаче высоковольтного потенциала и возникновении деформации дифференциальная термопара, подключенная к самопишущему прибору Н 3012, отметила появление разности температур. Абсолютное значение температуры части системы, расположенной в электрическом поле, оказалось на 0,5° С выше температуры окружающей среды ( $T_0 = 22^\circ\text{C}$ ). В

то же время значение температуры противоположной части системы опускалось ниже  $T_0$  на такую же величину. Динамика отклонения температуры в зоне испарения и конденсации от первоначальной представлена на рис. 3. Таким образом, часть системы (см. рис.1), находящаяся в поле, играет роль конденсатора К, в то время как противоположная — является испарителем И. Для увеличения разности температур необходимо оптимизировать режим работы и конструкцию ЭГД-холодильника, подобрать теплоноситель.

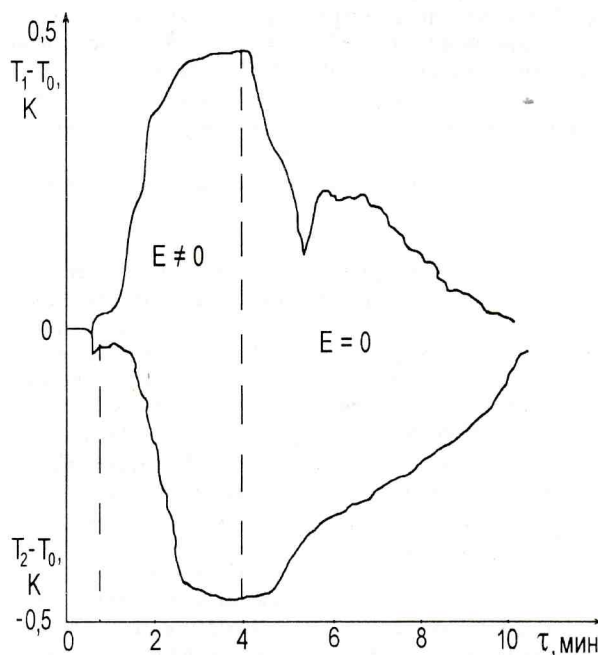


Рис.3. Динамика изменения температуры

Проанализируем основные энергетические потоки, которые можно записать в виде:

$$-\delta q_{ж} + \delta q_{п} - \delta u = 0, \quad (1)$$

где  $u$  — энергия, накапливаемая в электрическом многослойном конденсаторе, определяемая уравнением

$$\delta u = \epsilon_0 \epsilon_n E^2 v_{ж}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_n$  — диэлектрическая проницаемость пара;  
 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ;  
 $E$  — напряженность электрического поля, В/м (кВ/см);  
 $v_{ж}$  — удельный объем жидкости, м<sup>3</sup>/кг.

Количество тепла, переносимое паром:

$$\delta q_{п} = C_{рп} \cdot \Delta T - v_{п} \cdot \Delta P_{п}, \quad (3)$$

жидкостью:

$$\delta q_{ж} = C_{рж} \cdot \Delta T, \quad (4)$$

где  
 $C_{рп}$ ,  $C_{рж}$  - удельные изобарные теплоемкости пара и жидкости, Дж/кг К;  
 $v_{п}$  - удельный объем пара;  
 $\Delta P_{п}$ ,  $\Delta T$  - разность давления пара и температурный перепад между испарителем и конденсатором, Па.

Разность давлений между конденсатором и испарителем в результате смещения фазового равновесия может быть определена из эксперимента или рассчитана по любой известной зависимости, например, из уравнения:

$$P_{пЕ} = P_{п0} [1 - \exp(-\delta \epsilon_{д} / RT)] = P_{п0} \delta \epsilon_{д} / RT, \quad (5)$$

где  
 $P_{пЕ}$ ,  $P_{п0}$  - давление пара в поле и в его отсутствии соответственно;  
 $T$  - температура пара, К;  
 $R$  - газовая постоянная, Дж/кг К;  
 $\delta \epsilon_{д}$  - изменение теплоты испарения (Дж/кг), определяемое на основании экспериментальных данных или рассчитанное по формуле:

$$\delta \epsilon_{д} = v_{ж} \cdot T \frac{\epsilon_0}{2} \cdot \left( \frac{d\epsilon_{д}}{dT} \right) E^2, \quad (6)$$

где  $\epsilon_{д} = (d\epsilon / d\rho)_{T,p}$  - дифференциальная диэлектрическая проницаемость среды плотностью  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>).

Подставляя определенные величины в (1) и добавляя необходимые из электростатики, находим:

$$\Delta T / T = \frac{v_{ж} \epsilon_0 E^2}{2 \delta C_p} \cdot \frac{d\epsilon_{д}}{dT}, \quad (7)$$

Полученное уравнение по форме подобно уравнению, описывающему электрокалорический эффект однородной фазы [7]. Различие заключается в определении производной диэлектрической проницаемости по температуре. Для ячейки (рис.1) имеем:  $T_{кр} = 487$  К,  $v_{ж} = 0.630 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/кг,  $d\epsilon_{д}/dT = 4 \cdot 10^{-5}$ ,  $\delta C_p = C_{рж} - C_{рп} = 0.298$  кДж/кг · К. Для условий эксперимента  $E = 0.85 \cdot 10^6$  В/м. Подставляя эти данные в (7), находим:  $\Delta T / T = 5.55 \cdot 10^{-3}$ , что при температуре  $T = 300$  К составляет  $\Delta T \cong 1.7$  К, то есть близко к экспериментальным данным.

В уравнения (6, 7) входит производная дифференциальной диэлектрической проницаемости по температуре ( $d\epsilon_{д}/dT$ ), что требует предварительного ее измерения или вычисления. Поэтому полученная зависимость может быть использована для определения  $d\epsilon_{д}/dT$  по известному холодильному эффекту, который измерить проще.

Описанная система позволяет создавать разность температур, однако совершать работу или

охлаждать объекты с ее помощью проблематично, ввиду малых эффектов. Повысить эффективность работы ЭГД-холодильника можно путем увеличения рабочей температуры теплоносителя и циклической деформации границы раздела, посредством использования импульсного поля. Ниже приведем расчет холодопроизводительности ЭГД-ИКХ, работающей в указанном режиме, используя полученные результаты на другой установке [8], где одновременный контроль температуры и давления пара позволил построить реальный цикл ЭГД-холодильника в  $P - v$  диаграмме.

Данные  $P$ ,  $T$ , измеренных в зоне конденсации, позволяют в приближении идеального газа рассчитать удельный объем пара для каждой точки процесса, используя уравнение состояния Клапейрона:

$$v = R_{п} T / P, \quad (8)$$

где  
 $R_{п} = 44.46$  Дж/кг · К - газовая постоянная для хладона 113;

$P$ ,  $T$  - измеренные давление и температура пара.

Результаты обработанных таким образом экспериментальных данных представлены на рис. 4, из которого видно, что процесс работы ЭГД-ИКХ в описанных условиях представляет собой холодильный цикл, осуществляемый между изотермами 325 и 337 К. Начальное состояние ЭГД-холодильника, отмеченное точкой 1, соответствует стационарному режиму в отсутствие поля (к испарителю подводится тепло, а от конденсатора отводится). Включение поля смещает равновесие в зоне конденсации, при этом изменяются  $P$ ,  $v$ , в результате чего система приходит в состояние 2, в котором может находиться сколь угодно долго. Следует отметить, что переход из т.1 в т.2 происходит по сложному пути, в частности первоначально (от т.1) процесс близок к адиабатному расширению пара сопровождается его охлаждением с дальнейшим изо-

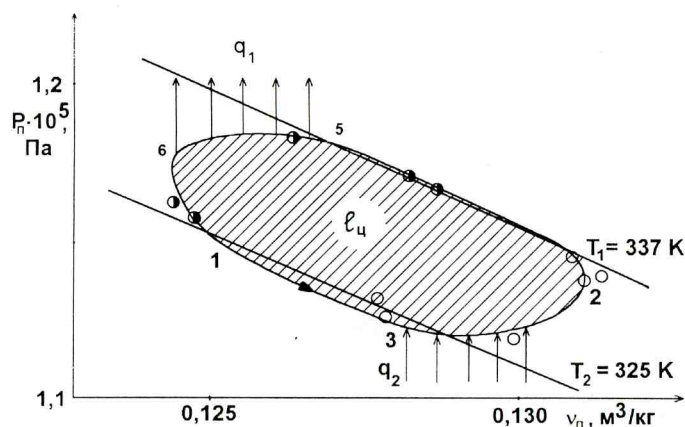


Рис.4 Термодинамический цикл ЭГД-ИКХ в  $P$ - $V$  диаграмме

барным подводом тепла к хладагенту от холодного источника (3-4). Этот процесс продолжается до температуры, близкой к 325К, после чего происходит расширение пара с повышением его температуры (4-2). С момента выключения поля (т.2) осуществляется изотермическое сжатие пара до некоторого объема (т.5), затем изобарный процесс охлаждения пара (5-6) с последующим адиабатным возвратом системы в исходное состояние 1 (6-1).

По данным цикла рассчитаем: отбираемое от холодного источника тепло  $Q_2$ ; тепло, отдаваемое горячему источнику  $Q_1$ , и работу в цикле  $L_u$ .

$$\begin{aligned} q_1 &= P \cdot \Delta v = \\ &= 1,17 \cdot 10^5 (0,1270 - 0,1255) = 176 \text{ Дж/кг.} \\ q_2 &= p \cdot \Delta v = \\ &= 1,115 \cdot 10^5 (0,1302 - 0,1288) = 156 \text{ Дж/кг.} \quad (9) \\ l_u &= \Delta T \cdot \Delta S = \Delta T \cdot \delta r / T = \\ &= 6 \cdot 1,25 \cdot 10^3 / 325 = 23,1 \text{ Дж/кг.} \end{aligned}$$

Масса хладагента, заправленного в ЭГД-ИКХ, составляла  $m = 75$  г. Поэтому абсолютные величины теплот будут равняться  $Q_2 = 11,7$  Дж;  $Q_1 = 13,2$  Дж;  $L_u = 1,7$  Дж. Рассчитанные величины показывают, что горячему источнику в обратном процессе передается тепло  $Q_1$ , равное сумме тепла  $Q_2$ , отбираемого из холодного источника, и тепла, эквивалентного подводимой в цикле работе  $L_u$ .

$$Q_1 = Q_2 + L_u = 13,2 \cong 11,7 + 1,7. \quad (10)$$

Максимальный холодильный коэффициент цикла ( $\epsilon_x$ ) (цикл Карно) равен:

$$\epsilon_x = \frac{T_x}{T_r - T_x} = 325 / (337 - 325) = 27. \quad (11)$$

Столь высокий коэффициент определяется малой величиной  $T_r - T_x$  и значительной температурой  $T_x$ .

В связи с тем, что система проходит от т.3 до т.4 примерно за  $\tau = 20$  с, холодопроизводительность ЭГД-холодильника составит:

$$Q_2 / \tau = 11,7 / 20 = 0,58 \text{ Вт.} \quad (12)$$

Однако в этом режиме система неустойчива и реальная холодопроизводительность меньше, причем минимальное ее значение можно оценить по времени перехода ЭГД-ИКХ от т.1 до т.2 ( $\tau = 180$  с) и оно будет равно 0,065 Вт.

Затрачиваемая мощность ( $N_E$ ) на создание поля составила [8]:

$$N_E = U J = 27,5 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 0,082 \text{ Вт,} \quad (13)$$

где  
U - разность потенциалов;  
J - ток процесса.

Холодильный эффект при этом будет равен  $\epsilon_x = Q_2 / N_E \tau = 6,9$ , то есть далек от идеального цикла Карно. Расхождения, по-видимому, связаны с неточностью определения временных параметров, расчетов  $v$  и неоптимальностью процесса.

Проведенные исследования осуществлялись при оптимальном уровне заправки теплоносителем ЭГД испарительно-конденсационной системы [6], однако для ЭГД-холодильника она может не являться таковой. Поэтому определим необходимое количество теплоносителя для холодильника.

За один цикл рабочего тела может быть отведено теплоты:

$$Q = \gamma \cdot m_T = 1,45 \cdot 10^5 \cdot 75 \cdot 10^{-3} = 10,9 \text{ кДж.} \quad (14)$$

Если учесть, что примерно через 200 с ЭГД-ИКХ достигает предельного охлаждения, то мощность, отведенная в этом случае, составит:

$$Q_0 / \tau = \gamma \cdot m_T / \tau = 54,4 \text{ Вт.} \quad (15)$$

С другой стороны, отводимую мощность можно определить по изменению теплового режима ЭГД-ИКХ:

$$Q_0 / \tau = C_c \cdot m_c \cdot \Delta T / \tau, \quad (16)$$

где  
 $C_c$ ,  $m_c$  - изобарная теплоемкость и масса системы соответственно ( $C_c = 0,63 \cdot 10^3$  Дж/кг К;  $m_c = 1,3$  кг);  
 $\Delta T$  - достигнутая разность температур.

Приравняв выражения (15) и (16) и взяв необходимые данные из рис.4 (для хладона-113  $\gamma = 1,45 \cdot 10^5$  Дж/кг), найдем оптимальное количество теплоносителя:

$$\begin{aligned} m_T &= C_c \cdot m_c \cdot \Delta T / \gamma = \\ &= 630 \cdot 1,3 \cdot 12 / 1,45 \cdot 10^5 = 67,8 \text{ г.} \quad (17) \end{aligned}$$

Таким образом, для лучшей работы ЭГД-холодильника требуется большее количество теплоносителя (хладагента).

Представленные расчеты показывают, что ЭГД-холодильный эффект соизмерим с отводимой мощностью конденсатора в ЭГД испарительно-конденсационной системы [8], являясь, по-видимому, тем фактором, который обеспечивает возможность передачи системой того же количества тепла при меньшей разности температур между испарителем и конденсатором и ее независимость от подводимой мощности.

Таким образом, показана возможность использования ЭГД смещения равновесного состояния двухфазной системы пар-жидкость для получения холодильного эффекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа энергетического баланса ЭГД-ИКС получена расчетная зависимость (7) величины холодильного эффекта, которая может быть использована для вычисления дифференциальной диэлектрической проницаемости.

Построен холодильный цикл реального устройства в  $P - v$  диаграмме, вычислены основные его характеристики и намечены пути совершенствования конструкции и режимных параметров. Следует отметить необходимость учета ЭГД-холодильного эффекта при анализе и расчете теплообмена при конденсации в электрическом поле.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Янговский Е.И., Толмач И.М. Магнитогиродинамические генераторы. М.: Наука, 1972. 424 с.
2. Савин И.К., Болога М.К., Коровкин В.П. Влияние электрического поля на интенсивность теплообмена при испарении // Электронная обработка материалов. 1986. №6. С.52-54.
3. Савин И.К., Дурнеску Р.С. Влияние электрического поля на фазовое равновесие теплоносителя и тепловой режим ЭГД-ИКС // Респуб. научно-техническая конф., посвященная 25-летию образования КПИ им.С.Лазо: Тез.докл. Строительство и архитектура. Кишинев, 1989.С.146.
4. Дидковский А.Б., Болога М.К. О критической напряженности электрического поля в условиях пленочной конденсации пара // Электронная обработка материалов. 1980. №3. № С.50-52.
5. Смирнов Г.Ф., Лунев В.Г. Определение критической напряженности электрического поля для падающей пленки жидкого диэлектрика // ИФЖ. 1960. Т.21. №2. С. 362-364.
6. Болога М.К., Савин И.К. Электрогидродинамические испарительно-конденсационные системы. Кишинев: Штиинца, 1991. 108 с.
7. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики. Киев: Наукова Думка, 1989. 256 с.
8. Болога М.К., Савин И.К., Бычков А.В. Особенности работы электрогидродинамической испарительно-конденсационной системы // Изв. АН РМ. Физика и техника. 1994. №2. С.82-85.