

Теплообмен при электрогидродинамической прокачке в испарительно-конденсационной системе

М. К. Болога, Ф. П. Гросу, И. В. Кожевников, А. А. Поликарпов, О. В. Моторин

*Институт прикладной физики АН Молдовы,
ул. Академическая, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, e-mail: mbologa@phys.asm.md*

Приводятся гидродинамические и температурные закономерности тепломассопереноса в контуре испарительно-конденсационной системы, представляющей собой пульсационную тепловую трубу со встроенными нагревателем рабочей жидкости, одновременно служащим испарителем, конденсатором пара и электрогидродинамическим (ЭГД) насосом, предназначенным для принудительной прокачки теплоносителя. Раскрыто влияние на теплоотдачу электрического тока и напряжения на ЭГД насосе, подаваемой мощности нагрева, температурного напора и других факторов с целью выявления физических особенностей исследуемых процессов и создания теоретических предпосылок для их расчета. Электрическое поле не накладывается традиционно на всю систему, охватывающую зоны испарения и конденсации, а выводится за их пределы в виде отдельной компоненты системы – ЭГД насоса. Экспериментальные данные обработаны в виде «спрямленных» зависимостей, носящих обобщенный характер, между определяемыми и определяющими параметрами процесса. Результаты могут быть использованы для углубленных исследований, а также проектирования и создания охлаждающих и термостабилизирующих малогабаритных ЭГД устройств.

Ключевые слова: пульсационные тепловые трубы, электрогидродинамический насос и прокачка, электрическое поле, теплоотдача, двухфазная смесь, аппроксимация данных.

УДК 536.248.2

ВВЕДЕНИЕ

Неуклонный прогресс в области компьютерной и радиоэлектронной техники требует создания новых и совершенствования существующих методов теплоотвода с учетом миниатюризации рассматриваемой техники, то есть возникла необходимость отвода тепла с малых теплоотдающих поверхностей при больших тепловых нагрузках [1, 2]. В этих и других аналогичных случаях целесообразно обратиться к нетрадиционным способам теплосъема, основанных, в частности, на применении фазовых переходов, в пульсационных тепловых трубах (ПТТ) [3, 4]. Что касается охлаждения интересующей нас компьютерной и радиоэлектронной техники, то наиболее естественным представляется воспользоваться электрогидродинамическими способами, основанными на явлении электрической конвекции (ЭК) [5, 6], поскольку необходимые для возникновения и поддержания ЭК поля в рассматриваемой технике существуют в силу ее специфики. Под этим углом зрения в работе [7] рассматривались закономерности тепломассопереноса в испарительно-конденсационной системе (ИКС), в которой прокачку теплоносителя осуществляли с помощью ЭГД насоса типа «игла – кольцо». В отличие от традиционно используемых ЭГД преобразователей, вмонтированных в ИКС [8], в рассматриваемом случае он представляет собой отдельную компоненту цикла, что

придает системе более высокую эффективность и надежность, подтвержденные опытными данными. Однако проведенные в [7] исследования носили тестирующий, предварительный характер. Для обобщений и дальнейших практических рекомендаций необходимы были дополнительные экспериментальные данные.

В нашей работе система охлаждения основана на использовании более совершенного по сравнению с [7] малогабаритного автономного ЭГД насоса в контуре испарительно-конденсационной системы (рис. 1), предназначенного для прокачки теплоносителя из зоны нагрева в зону конденсации и обратно. Причем функционирование ИКС обеспечено при любой ее ориентации по отношению к полю тяжести. Вывод ЭГД насоса вне зон кипения и конденсации по сравнению со случаями, когда один из электродов служит одновременно и эмиттером, и теплоотдающей поверхностью, а противоположный (по аналогии) – коллектором электрических зарядов и поверхностью конденсации [8], имеет ряд очевидных преимуществ. Прежде всего, в случае необходимости возможна быстрая рекуперация или замена преобразователя. Кроме того, он функционирует в более благоприятных условиях тепломассопереноса при наличии только жидкой фазы (пузырьки в ЭГД насосе не допускаются), легко регулирует режим его работы, менее вероятны электрические пробой и сопутствующие этому негативные явления.

Известно, что экспериментальные данные по измерению электрических токов в жидких диэлектриках весьма нестабильны по отношению как к самим измерениям, так и к различного рода случайным изменениям тока через ЭГД систему (по сравнению с аналогичными измерениями или изменениями напряжения). Следовательно, величины, напрямую зависящие от силы тока, целесообразно выразить через напряжение, что означает предварительное выявление вольт-амперных характеристик (ВАХ) ЭГД насоса как одной из первоочередных задач.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Теплообменники

Нагреватели, служащие для нагрева жидкости и ее термостатирования (рис. 1), выполнены из медной трубки, а каналы, соединяющие зоны испарения и конденсации, – из прозрачных силиконовых трубок (внутренним диаметром 3 мм). Вместе они образуют замкнутую циркуляционную систему. Подвод тепла в зону нагрева и испарения осуществляется омическим нагревателем (ТЭН1), намотанным на медную трубку, являющуюся нижней частью контура. В продольных пазах определенной глубины находятся термопары Т1–Т3 для измерения температуры теплоотдающей стенки. Вокруг основного нагревателя предусмотрен охранный – ТЭН2, предназначенный для компенсации тепловых потерь в окружающую среду. Между ТЭН1 и ТЭН2 установлены термопары Т4–Т7, служащие для регистрации тепловых потерь основного нагревателя и их компенсации охранным нагревателем. На входе и выходе канала нагревателя в специальных гильзах расположены термопары Т8 и Т9, по которым определялась средняя температура теплоносителя.

Зона конденсации (конденсатор К) выполнена в виде медной трубки с рубашкой охлаждения. Температура охлаждающей воды, подаваемой ультратермостатом УТ, на входе и выходе конденсатора измерялась термопарами Т10 и Т11. В целях поддержания давления в контуре на определенном уровне к каналу подсоединены расширительный сильфон СН и манометр Б с клапаном КЛ. Между насосом и зоной теплоподвода для поддержания постоянной температуры теплоносителя на входе основного нагревателя размещен дополнительный омический нагреватель ТЭН3.

Подводимые электрические мощности на нагреватели варьировались с помощью автотрансформаторов 1, 2, 3 и измерялись ваттметром. Показания регистрировались цифровым вольтамперметром.

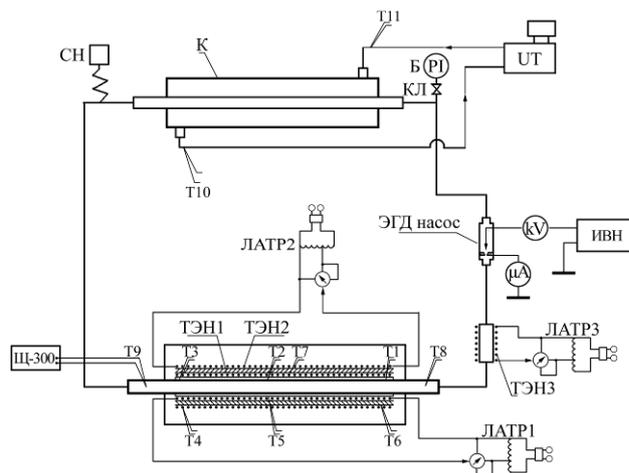


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

ЭГД насос

В одном из каналов (рис. 1 справа), соединяющих зоны испарения и конденсации, установлен ЭГД насос, прокачивающий теплоноситель. В испарителе благодаря нагреву ТЭН1 образуются пузырьки пара, которые под действием гидродинамических сил и сил Архимеда перемещаются вдоль канала к зоне конденсатора К, в котором главным образом и конденсируются. Пузырьки, не успевшие сконденсироваться, дойдя до клапана КЛ, всплывают через него, чтобы исключить их попадание в ЭГД насос и его межэлектродное пространство, что отрицательно сказалось бы на прокачке жидкости. Насос питался от источника высокого напряжения (ИВН). Максимальное напряжение, применяемое в опытах, составляло 20 кВ, сила электрического тока – не более десятков микроампер. Измерялись киловольтметром и микроамперметром согласно схемам рис. 1.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

После тщательной промывки контур заполнялся теплоносителем (н-пентан, $T_{кип} = 36,5^{\circ}\text{C}$ или н-гексан, $T_{кип} = 68,7^{\circ}\text{C}$; впоследствии данные, как более надежные, приведены только для н-гексана), включалась система охлаждения конденсатора К и подавалась определенная электрическая мощность на основной нагреватель ТЭН1. При повышении температуры и закипании теплоносителя, что визуально регистрировалось (появлялись пузырьки пара в прозрачных участках канала), росло давление в контуре. Поэтому посредством клапана КЛ выпускался пар, и давление снижалось до первоначального. Подобным способом обеспечивалось удаление совместно с паром и оставшейся в канале части воздуха. Определенная электрическая мощность (компенсирующая тепловые потери основного нагревателя) подавалась на охранный нагреватель ТЭН2,

а высокое напряжение – на электроды насоса, и таким образом создавалась ЭГД циркуляция теплоносителя. Использование ЭГД насоса, потребляющего незначительную мощность (милливатты), обеспечивало функционирование системы, заполненной жидким диэлектрическим теплоносителем, при конвективном теплообмене, кипении и конденсации. Температура теплоносителя на входе зоны испарения поддерживалась заданной варьированием мощности ТЭНЗ. Функцию холодильника выполняла и вся основная часть контура. Скорость теплоносителя определялась по скорости движения пузырьков, которые в свою очередь находились по данным кино съемки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Влияние электрических факторов на тепло-массоперенос проявляется посредством вынужденного движения, вызываемого ЭГД насосом. Поэтому выясним зависимость скорости прокачки жидкости от силы тока и напряжения, обсудив предварительно зависимости (ВАХ) $I = I(U)$.

ВАХ ЭГД насоса

Находим зависимость тока через ЭГД насос от приложенного к нему напряжения. На основе опытных данных и аналогий при коронном разряде в газах предполагаем, что она имеет вид

$$I = a \cdot U^2 + b \cdot U + c, \quad (1)$$

где три параметра: a , b , c – однозначно определяют ВАХ и подлежат экспериментальному нахождению.

Обобщим эту зависимость методами подобия, вводя масштабные и безразмерные величины для U и I согласно формулам:

$$U_* = U / U_0; \quad I_* = I / I_0, \quad (2)$$

где индексы «0» и «*» означают масштабные (размерные) и безразмерные величины соответственно. Подставив формулу (2) в (1), получим

$$\frac{I_0 \cdot I_*}{a \cdot U_0^2} = U_*^2 + \frac{b}{a \cdot U_0} \cdot U_* + \frac{c}{a \cdot U_0^2}. \quad (3)$$

Полагая (3), по определению

$$U_0 \equiv -b / (2a); \quad I_0 \equiv a \cdot U_0^2 \equiv b^2 / (4a) \quad (4)$$

найдем универсальную обобщенную ВАХ в виде биссектрисы:

$$Y = |X|, \quad (5)$$

где

$$Y \equiv \sqrt{I_* + \Delta_*}; \quad X \equiv U_* - 1; \quad (6)$$

$$\Delta_* \equiv \Delta / b^2 \equiv (b^2 - 4ac) / b^2. \quad (7)$$

Рассмотрим пример ВАХ ЭГД насоса, работающего в гидростатическом режиме (U , кВ; I , А):

$$I = 5,594 \cdot 10^{-9} U^2 - 5,516 \cdot 10^{-8} U + 1,573 \cdot 10^{-7}. \quad (8)$$

График полинома (8) представлен на рис. 2.

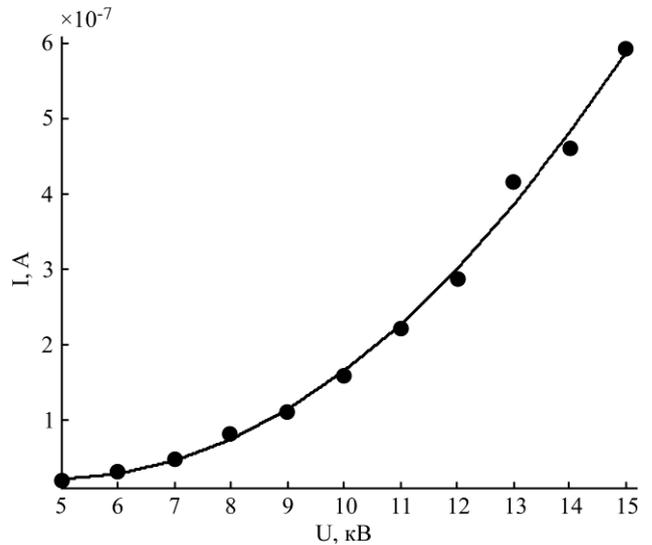


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика ЭГД насоса.

Зная его коэффициенты, по формулам (4) и (7) найдем

$$U_0 = 4,930; \quad I_0 = 1,360 \cdot 10^{-7} \text{ и } \Delta_* = -0,157, \quad (9)$$

и этот же график в обобщенных координатах

$$Y \equiv \sqrt{0,735 \cdot 10^7 \cdot I - 0,157}; \quad X \equiv 0,203 \cdot U - 1 \quad (10)$$

представим согласно рис. 3 в виде отрезка биссектрисы.

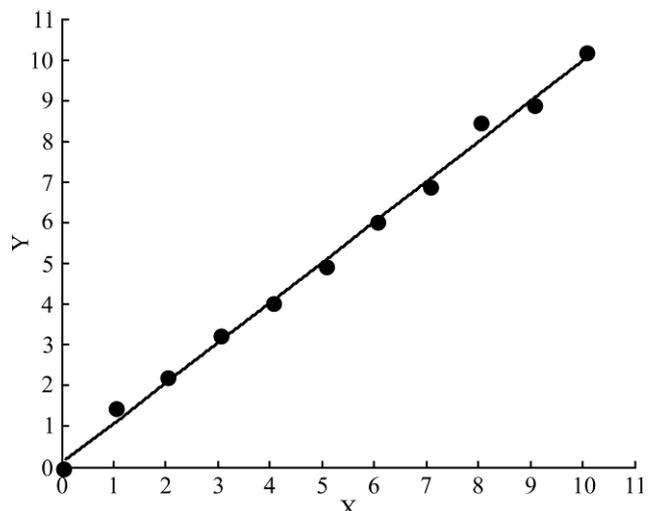


Рис. 3. Обобщенная ВАХ.

Любая тройка чисел (a , b , c) определяет параболу типа рис. 2, а семейство всех парабол укладывается на биссектрисе рис. 3. Идентифицировать отдельные ВАХ на обобщенной (рис. 3) можно по экспериментальным точкам, специально обозначенным для каждой из ВАХ.

Суть обобщения состоит в упрощении зависимостей и в придании им компактной единой формы в виде прямой, которая гораздо нагляднее и точнее позволяет судить о согласии между экспериментальными и расчетными данными. Заметим, что переход от криволинейных графических представлений к прямолинейным – это метод «спрямления» кривых, который широко применяется на практике для обработки экспериментальных данных. Например, для степенных функций традиционным методом спрямления при составлении критериальных уравнений является метод логарифмирования [9].

Гидродинамические закономерности

Движение двухфазной смеси в узком вертикальном прозрачном канале (слева на рис. 1) регистрировалось высокоскоростной видеокамерой. С помощью специальной программы по обработке изображений определялись диаметры и скорости движения паровых пузырьков. Сначала остановимся вкратце на некоторых качественных особенностях поведения теплоносителя в ПТГ. Прежде всего отметим, что при отсутствии электрического поля ($U = 0$) и достаточно высоких тепловых нагрузках P на испарителе наблюдается пульсационное возвратно-поступательное движение смеси [3, 4], согласно рис. 4, из которого видно, что если скопления пузырьков слева от кадра «г», то есть от максимума светлой области на рисунке, двигались вдоль трубы вниз, то после данного положения движутся в противоположную сторону, чем и подтверждается сказанное.

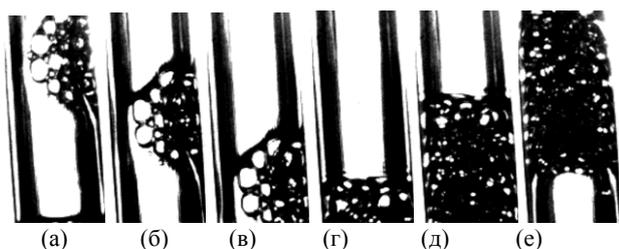


Рис. 4. Пульсационное движение двухфазной смеси при отсутствии ЭГД прокачки. $P = 20$ Вт, $U = 0$ кВ, 300 кадров/с.

При включении ЭГД насоса ($U \neq 0$) и увеличении напряжения период пульсаций возрастает, одновременно уменьшаются и размеры пузырьков. Это объясняется тем, что они отрываются раньше от центров парообразования и уносятся потоком жидкости. При этом крупные скопления пузырьков в горизонтальных участках каналов не успевают образовываться. Начиная с 10–12 кВ, возвратно-поступательное движение теплоносителя исчезает, и оно становится однонаправленным, причем снарядный режим движения парогазовой смеси переходит в пузырьковый (рис. 5).

При росте напряжения наблюдается уменьшение диаметров паровых пузырьков (рис. 6) от крупных, практически совпадающих с размерами диаметра трубки (рис. 6а,б), до размеров (при 18–20 кВ), практически неразличимых визуально (рис. 6д,е).

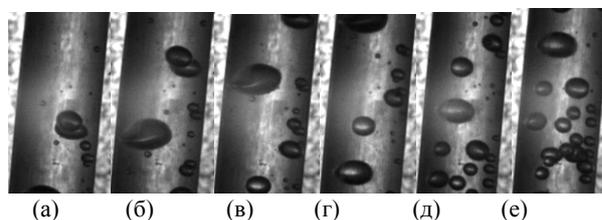


Рис. 5. Однонаправленное движение двухфазной смеси при ЭГД прокачке; серия быстротечных кадров: $P = 20$ Вт, $U = 18$ кВ, 1000 кадров/с.

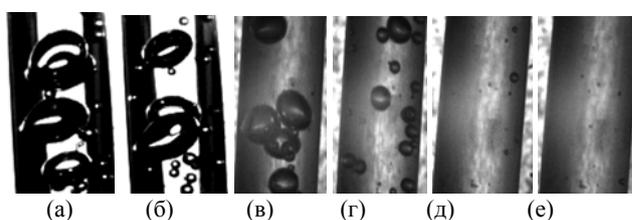


Рис. 6. Динамика изменения размеров пузырьков при ЭГД прокачке; напряжение, кВ: (а) – 10; (б) – 12; (в) – 14; (г) – 16; (д) – 18; (е) – 20. $P = 20$ Вт, 1000 кадров/с.

Количественные результаты представлены на рис. 7 в виде зависимостей скорости движения прокачиваемой двухфазной среды от силы тока через ЭГД насос при двух различных подводимых к испарителю тепловых мощностях.

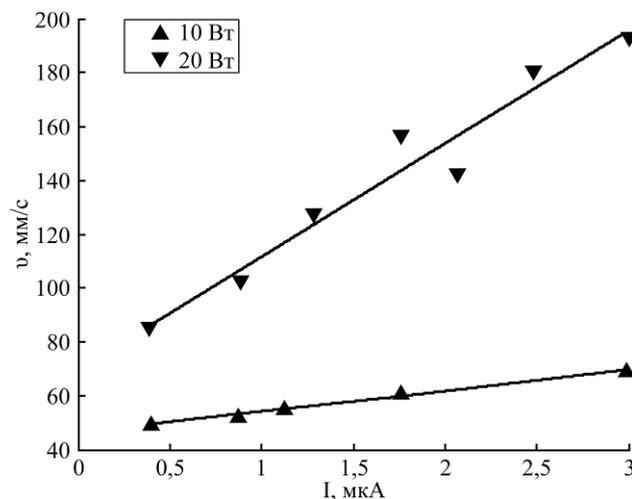


Рис. 7. Зависимость скорости прокачки теплоносителя от силы тока ЭГД насоса.

Одновременно с ростом напряжения происходит увеличение скорости смеси, причем ее скорость линейно зависит от величины тока в ЭГД насосе. Как видно из графика, влияние электрического поля проявляется сильнее в области более высоких тепловых нагрузок. Предположив, что зависимости скорости от мощности нагревателя P также линейны, можно записать:

$$v(P, I) = (\alpha + \beta \cdot P) \cdot I + \gamma + \delta \cdot P, \quad (11)$$

где коэффициенты α , β , γ , δ найдены по двум парам параметров прямых рис. 7 и равны:

$$\alpha = -26,605; \beta = 3,434; \gamma = 23,073; \delta = 2,332,$$

так что окончательно:

$$v(P, I) = (-26,605 + 3,434 \cdot P) \cdot I + 23,073 + 2,332 \cdot P. \quad (12)$$

Отложив по оси ординат выражение согласно формуле

$$Y \equiv (v - \gamma - \delta \cdot P) / (\alpha + \beta \cdot P) = I \quad (13)$$

или с учетом числовых коэффициентов:

$$Y \equiv \frac{v - 23,073 - 2,332 \cdot P}{-26,605 + 3,434 \cdot P} = X \equiv I, \quad (14)$$

вместо двух прямых (рис. 7) получим биссектрису на рис. 8, судя по которой можно заключить, что общая аппроксимация (12) достаточно хорошо отражает линейную зависимость скорости прокачки диэлектрической жидкости как от силы тока I , так и от мощности нагревателя P .

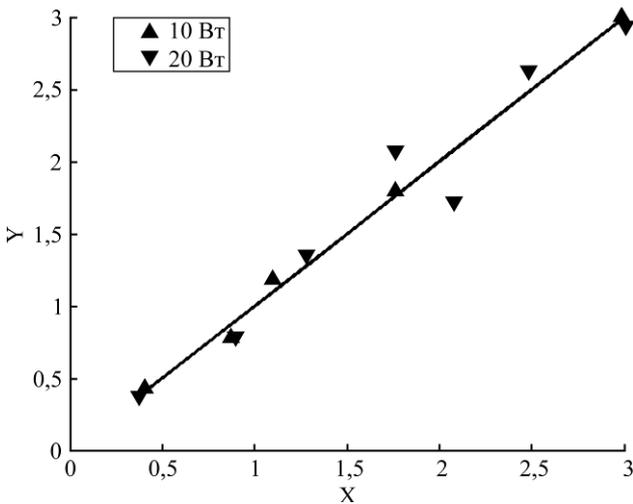


Рис. 8. Обобщенная зависимость скорости прокачки теплоносителя от силы тока и мощности подогрева.

Увеличение скорости v теплоносителя с ростом мощности нагрева P , очевидно, является следствием уменьшения его вязкости с ростом температуры.

Температурные особенности

Зависимости температуры T_2 теплоотдающей поверхности основного нагревателя от напряжения на ЭГД насосе при двух различных тепловых нагрузках представлены на рис. 9. Из рисунка видно, что с увеличением U температура теплоотдающей поверхности линейно уменьшается, что является прямым следствием роста теплоотдачи в связи с ростом скорости прокачки теплоносителя ЭГД насосом. Аналогично рис. 7, 8 можно аппроксимировать и рис. 9 общей линейной по переменным P и U зависимостью:

$$T_2 = (-0,532 + 0,018 \cdot P)U + (33,865 + 0,609 \cdot P). \quad (15)$$

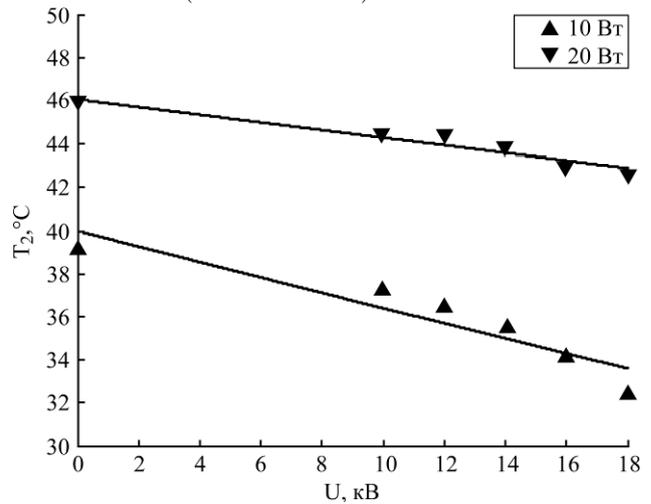


Рис. 9. Изменение температуры T_2 внутренней поверхности основного нагревателя от напряжения на ЭГД насосе.

Если по оси ординат отложим функцию

$$Y \equiv \frac{T_2 - (33,865 + 0,609 \cdot P)}{-0,532 + 0,018 \cdot P} = U, \quad (16)$$

получим график (рис. 10), объединяющий прямые (15), в виде биссектрисы (16).

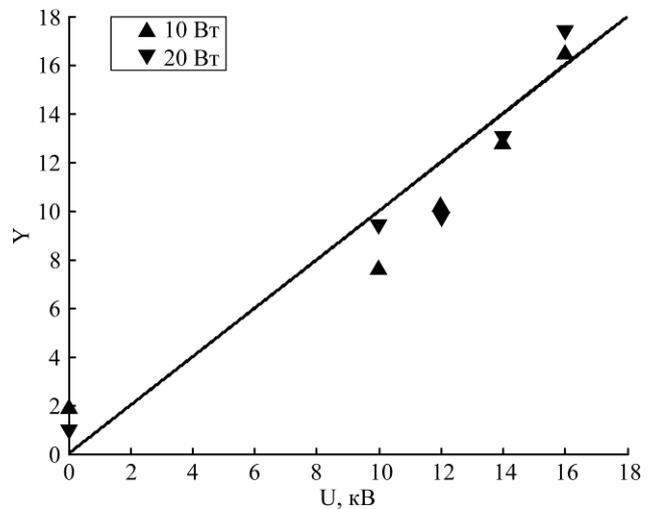


Рис. 10. Обобщенная зависимость температуры теплоотдающей поверхности от напряжения на ЭГД насосе.

По степени близости экспериментальных точек к биссектрисе можно судить о степени достоверности предлагаемых зависимостей. В данном случае приближение представляется менее удачным, поэтому предстоит уточнения.

Повышение температуры жидкости T_8 на входе в испаритель приводит к росту температуры теплоотдающей поверхности T_2 и переходу к неустойчивому течению теплоносителя, что отражено на рис. 11. Это связано с тем, что увеличение температуры теплоносителя на входе в испаритель напрямую благоприятствует повышению общей температуры, в том числе и теплоотдающей поверхности.

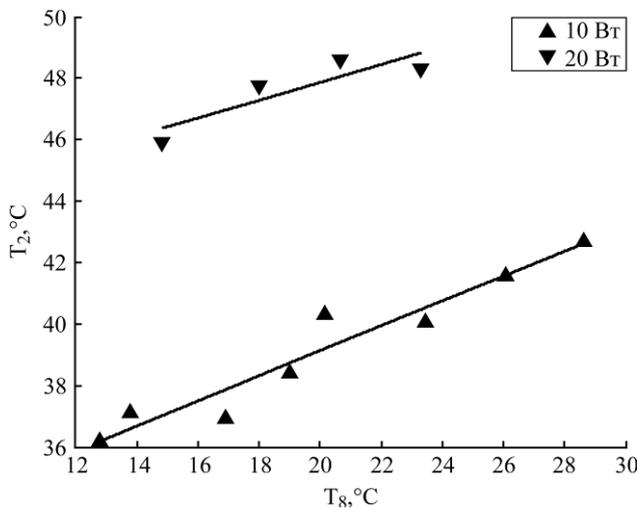


Рис. 11. Зависимость температуры T_2 от температуры теплоносителя на входе испарителя T_8 .

Учет и влияние мощности нагревателя по аналогии с предыдущими случаями осуществляются с помощью уравнения более общего вида:

$$T_2 = (0,521 - 0,012 \cdot P) \cdot T_8 + (19,935 + 1,105 \cdot P). \quad (17)$$

В обобщенном виде эта зависимость может быть представлена формулой (рис. 12)

$$Y \equiv \frac{T_2 - 19,935 - 1,105 \cdot P}{0,521 - 0,012 \cdot P} = T_8. \quad (18)$$

Разброс экспериментальных точек от расчетной прямой (18) (рис. 12) достаточно значим, однако это следствие исходных зависимостей (рис. 11) и на общем подходе «спрямления» кривых не сказывается.

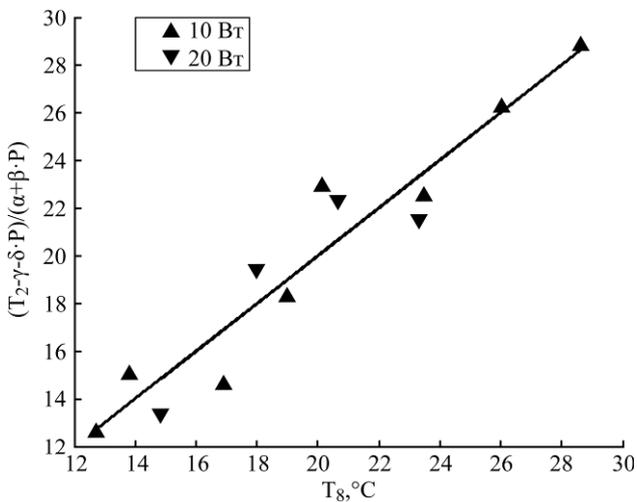


Рис. 12. Обобщенная зависимость температуры T_2 от температуры теплоносителя на входе испарителя T_8 .

Отмеченные в этом пункте температурные особенности в основном обусловлены явлениями переноса электрогидродинамического характера.

Коэффициент теплоотдачи

Как следствие рассмотренных температурных особенностей в зависимости от напряжения U , на ЭГД насосе наблюдается повышение коэффици-

ента теплоотдачи от стенки нагревателя к жидкости в зоне T_2 согласно рис. 13. При этом, начиная с $U = 16$ кВ, паровые пузырьки в потоке теплоносителя практически не наблюдаются.

По мере повышения подводимой мощности к основному нагревателю до возникновения пульсационного режима кипения коэффициент теплоотдачи α в зоне нагрева существенно возрастает (рис. 13), что связано, очевидно, с усилением электроконвективной теплоотдачи.

Зависимость на рисунке можно аппроксимировать параболой (U в кВ):

$$\alpha = 0,671 \cdot U^2 - 4,396 \cdot U + 403,403. \quad (19)$$

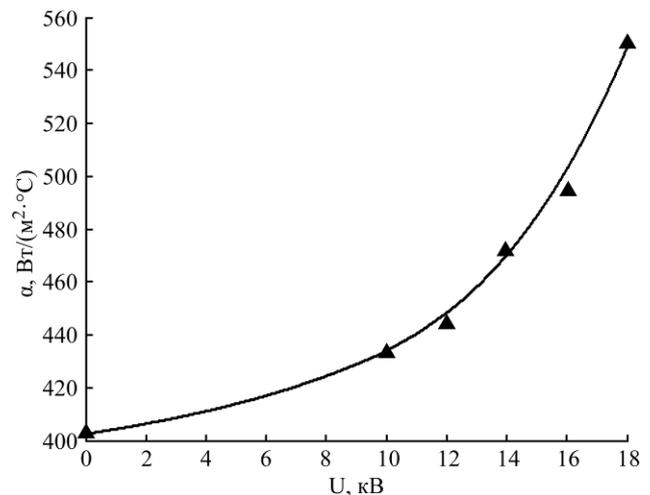


Рис. 13. Зависимость локального коэффициента теплоотдачи от напряжения при $P = 4,6$ Вт.

Насколько данная аппроксимация удачная, можно судить по обобщенной прямой, заданной общими формулами (5)–(7), в которых заменим I на α :

$$Y \equiv \sqrt{\alpha_* + \Delta_*}; \quad \alpha_* \equiv \alpha / \alpha_0; \quad X \equiv U_* - 1; \quad (20)$$

$$\alpha_0 = 7,204; \quad U_0 = 3,278; \quad \Delta_* = -54,992.$$

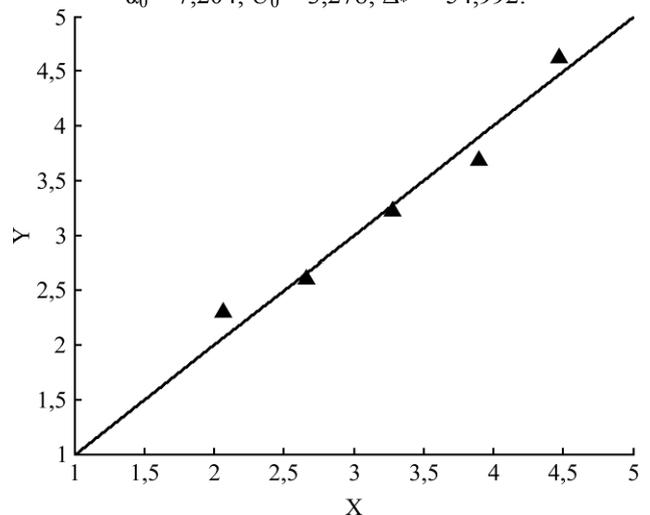


Рис. 14. Спрявленная (обобщенная) зависимость $\alpha(U)$ (см. график на рис. 13).

Парабола рис. 13 перейдет в биссектрису рис. 14. И, как видно из рис. 14, парабола (16) весьма удовлетворительно спрямлена.

Остановимся на зависимости коэффициента теплоотдачи от подаваемой мощности $\alpha(P)$. Вообще-то, при конвективной теплопередаче α не должен зависеть от тепловой мощности P . Факт наличия таковой говорит о том, что причину следует искать в процессах фазового перехода, в данном случае – парообразовании (кипения). Не вникая в физическую суть этих процессов, ограничимся рассмотрением закономерности, которой следуют экспериментальные точки рис. 15.

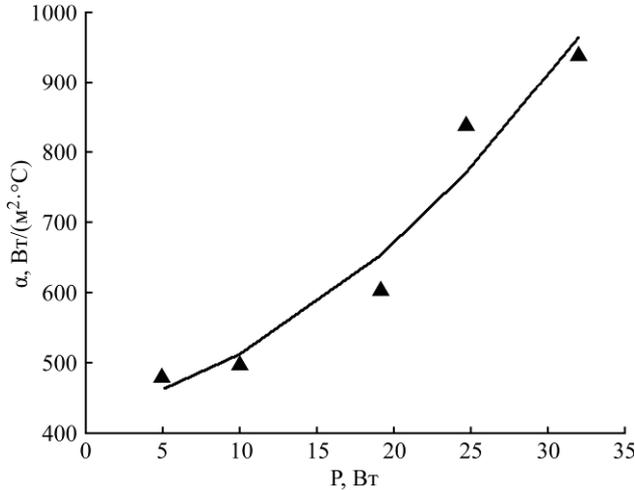


Рис. 15. Зависимость коэффициента теплоотдачи от мощности на основном нагревателе, $U = 18$ кВ.

Предполагая ее параболической, аналогично предыдущему случаю найдем:

$$\alpha = 0,404 \cdot P^2 - 3,620 \cdot P + 433,516. \quad (21)$$

Спряmlенная зависимость имеет вид прямой на рис. 16, уравнение которой представляет биссектрису:

$$Y = X,$$

где $X = (P/4,485) + 1$; $Y = \sqrt{(P/8,118) - 52,460}$.

$$(\alpha_0 = 8,118; P_0 = 4,485; \Delta_s = -52,460).$$

Как показывают оценки, разброс экспериментальных точек от расчетных по приведенным формулам не превышает в среднем ошибок эксперимента (~ 20%).

Среди важных зависимостей остается обсудить еще изменение коэффициента теплоотдачи от силы электрического тока через ЭГД насос, график которой представлен на рис. 17.

Такая линейная зависимость $\alpha(I)$ вполне увязывается с квадратичной зависимостью $\alpha(U)$ (рис. 13), если учесть квадратичность вольт-амперной характеристики (1).

Прямая рис. 17 имеет следующий аналитический вид (α – в ед. СИ, I – в мкА в соответствии с рис. 17):

$$\alpha = 54,333 \cdot I + 413,333. \quad (22)$$

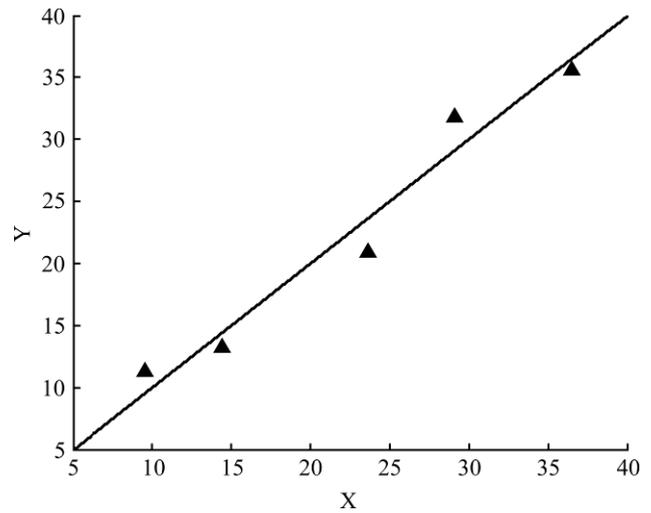


Рис. 16. Спряmlенная кривая $\alpha(P)$.

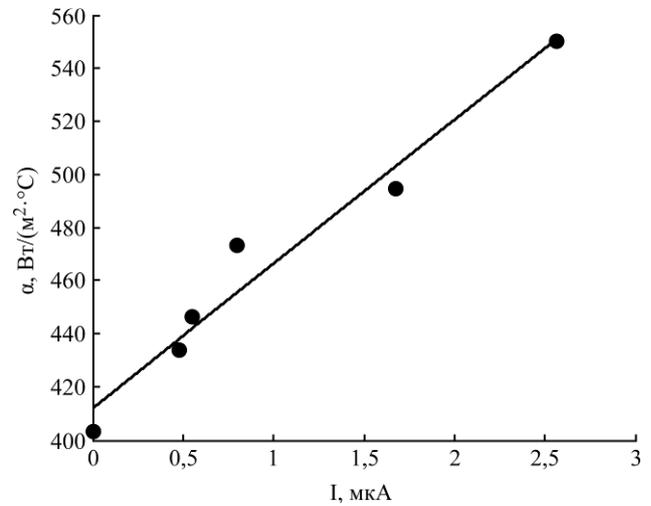


Рис. 17. Зависимость коэффициента теплоотдачи от силы электрического тока через ЭГД насос при $P = 4,6$ Вт.

Подставив в (22) (1) и сравнив полученное выражение с правой частью (19), найдем гипотетическую ВАХ, которая должна была иметь место в условиях снятия зависимости (22) (I – в мкА, U – в кВ):

$$I = 0,012 \cdot U^2 - 0,081 \cdot U - 0,183. \quad (23)$$

Разумеется, нельзя ставить вопрос о сравнении ВАХ (8), снятую для примера в гидростатических и изотермических условиях с ВАХ (23) гипотетической, соответствующей развитой теплопередаче. Однако взаимное преобразование зависимостей $\alpha(U)$ и $\alpha(I)$ на основе ВАХ $I(U)$ осуществляется по образцу приведенного примера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обобщения опытных данных с помощью критериальных уравнений необходимо существенно расширить базу экспериментальных данных, а в качестве основы для таких обобщений могут быть приняты подходы и соотношения, полученные выше, сущность которых сводится к следующему.

При проведении своеобразного обобщения опытных данных на основе спрямления квадратичных зависимостей им был придан вид отрезка биссектрисы первого квадранта плоской системы координат. Линейная функция двух переменных, которой аппроксимируются такие параметры процесса теплопереноса, как скорость течения теплоносителя в зависимости от силы тока, и др., также сведена к отрезку биссектрисы. Помимо простоты и наглядности полученные преобразования обладают общностью и могут быть предпосылкой для расширенных критерияльных обобщений, предусмотренных в будущем. Под практическим уклоном полученные результаты можно использовать при создании преобразователей малых габаритов, отличающихся отсутствием движущихся частей и повышенным ресурсом. Они позволят увеличить диапазон тепловых нагрузок, подводимых к испарителю (ограниченному возникновением кризиса кипения), интенсивность охлаждения стенки нагревателя и стабилизировать поток парожидкостной смеси (без скачков температур и давления, что крайне нежелательно в многочисленных инновационных устройствах). Полученные результаты представляют научный интерес и имеют прикладное значение в части интенсификации и термостатирования теплообменных процессов и аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

- Groll M., Khandekar S. State of the Art on Pulsating Heat Pipes. *Proceedings of the 2nd International Conference on Minichannels and Microchannels*. Rochester, New York, USA, June 17–19, 2004, pp. 33–44.
- Karimi G., Culham J.R. Review and Assessment of Pulsating Heat Pipe Mechanism for High Heat Flux Electronic Cooling. *Proceedings of InterSociety Conference on Thermal Phenomena*. Las Vegas, Nevada, USA, June 1–4, 2004, pp. 52–59.
- Кузнецов Н.О., Смирнов Г.Ф. Экспериментальное и математическое моделирование характеристик пульсационных тепловых труб (ПТТ). *Холодильна техника і технологія*. 2005, (5), 61–69.
- Кравец В.Ю., Наумова А.Н., Вовкоган А.Н. Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2010, (1), 39–43.
- Остроумов Г.А. *Взаимодействие электрических и гидродинамических полей*. М.: Наука, Физматгиз, 1979. 319 с.
- Гросу Ф.П., Болога М.К. Электроизотермическая конвекция и ее роль в процессе теплообмена. *ЭОМ*. 2008, 44(3), 25–35.
- Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожевников И.В., Поликарпов А.А., Моторин О.В. Теплообмен при электрогидродинамической прокачке двухфазного теплоносителя. *Тезисы докладов и сообщений XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену*, 10–13 сентября 2012 г., Минск. 2012. Т. 1. Ч. 2. С. 398–400.
- Болога М.К., Коровкин В.П., Савин И.К. *Двухфазные системы жидкость-пар в электрическом поле*. Кишинев: Штиинца, 1992. 243 с.
- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. *Теплопередача*. М.: Энергия, 1975. 487 с.

Поступила 08.11.13

Summary

The article considers hydrodynamic and temperature dependencies of heat and mass transfer in an evaporative condensing system representing a pulsating heat pipe with a built-in heater, used as an evaporator, a vapor condenser and an electrohydrodynamic pump for forced pumping through a coolant. The influence of the electric current intensity and voltage on the electrohydrodynamic pump, applied power, temperature head and other factors on heat transfer has been investigated in order to reveal physical peculiarities of the processes under investigation and creation of a background for their calculation. An electric field is used only in the electrohydrodynamic pump which is situated outside of the evaporator and condenser. Experimental data are treated in the form of “rectified” dependencies, having a generalized character, between dependent and governing parameters of the process. The obtained results can be used for in-depth investigations as well as for the design and fabrication of cooling and compact thermo-stabilizing electrohydrodynamic devices.

Keywords: pulsating heat pipes, electrohydrodynamic pump and pumping through, electric field, heat transfer, two-phase mixture, data approximation.