

УДК 536.24

*Представлено результати дослідження температури початку кипіння в зоні нагріву закритого двофазного термосифону. Показано, що температура початку кипіння залежить від виду теплоносія та геометричних характеристик термосифону*

*Ключові слова: термосифон, температура початку кипіння, густина теплового потоку*

*Представлены результаты исследования температуры начала кипения в зоне нагрева закрытого двухфазного термосифона. Показано, что температура начала кипения зависит от рода теплоносителя и геометрических характеристик термосифона*

*Ключевые слова: термосифон, температура начала кипения, плотность теплового потока*

*This article represents results of the research of the initial boiling in the heating area of the closed two-phase thermosyphon are offered. It is shown, that the initial boiling temperature depends on the type of the heat transfer agent and geometrical features of the thermosyphon*

*Key words: thermosyphon, temperature initial boiling, heat flux density*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАЧАЛА КИПЕНИЯ В ЗАКРЫТОМ ДВУХФАЗНОМ ТЕРМОСИФОНЕ

**В. Ю. Кравец**

Кандидат технических наук, доцент\*

Контактный тел.: (044) 454-96-03, 066-780-99-50

E-mail: kravetz\_kpi@ukr.net

**В. А. Чернобай**

Кандидат технических наук, доцент\*

Контактный тел.: 093-518-73-24

E-mail: chernobayv@hotmail.ru

**А. А. Никитенко\***

Контактный тел.: 066-862-91-66

E-mail: 4ao-4ao@ua.fm

**Бехмард Голамреза**

Аспирант\*

Контактный тел.: (044) 454 96 03

E-mail: kravetz\_kpi@ukr.net

\*Кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, каф.1520, г. Киев, 03056

### 1. Введение

Поиск путей интенсификации теплообмена при одновременном снижении массогабаритных характеристик теплонапряженных объектов приводит к созданию систем охлаждения, которые позволяют отводить значительные тепловые нагрузки при минимальных температурных перепадах. Одними из таких эффективных теплопередающих устройств в настоящее время являются двухфазные термосифоны, реализующие в процессе своей работы испарительно-конденсационный цикл [1]. Благодаря своим эффективным теплопередающим свойствам и относительной простоте изготовления двухфазные термосифоны нашли широкое применение в различных теплообменных аппаратах [2].

Процесс передачи тепловой энергии в термосифоне связан с изменением агрегатного состояния вещества (теплоносителя). Возникновение паровой фазы в зоне нагрева термосифона приводит к интенсификации процессов теплообмена в ней и началу эффективной работы всего устройства в целом. В [3] показано, что до момента активации первых центров парообразования (режим конвекции) тепловая энергия в термосифоне практически не передается. При этом температура в

зоне нагрева монотонно возрастает до значений, которые в некоторых случаях превышают допустимую для объекта охлаждения. Теплоноситель перегревается относительно температуры насыщения и переходит в область метастабильного (неустойчивого) состояния [4]. При достижении некоторого температурного уровня, связанного с родом жидкости и состоянием поверхности теплообмена, происходит возникновение первых паровых пузырей, что приводит к резкому снижению температуры в зоне нагрева и росту температуры в зоне конденсации. В дальнейшем наблюдаются периодические выбросы теплоносителя из зоны нагрева в зону конденсации и связанные с этим температурные возмущения [5,6]. Одновременно это сопровождается и пульсациями давления внутри термосифона [7]. Увеличение тепловой нагрузки приводит к снижению таких периодических пульсаций температуры и в дальнейшем к их исчезновению [5]. Поэтому, для надежной работы теплонагруженных устройств необходимо знать условия возникновения таких пульсационных явлений, в каком диапазоне тепловых нагрузок они существуют и каким температурным колебаниям могут быть подвержены элементы теплообменного оборудования. Однако наиболее важным является начало работы термосифона, когда начальный перегрев

зоны нагрева достигает больших значений. При этом необходимо выявить факторы, которые оказывают на это существенное влияние.

## 2. Постановка задачи исследования

Исследование посвящено определению температуры начала кипения в закрытых двухфазных термосифонах (внутренние диаметры  $d_{вн} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , длиной 0,7 м) при различных подводимых плотностях теплового потока. Уровень шероховатости (высота неровностей) внутренней поверхности термосифонов составлял  $(0,5-1) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . В качестве теплоносителей использовались дистиллированная деаэрированная вода и этиловый спирт. Коэффициент заполнения  $k$ , равный отношению объема, занимаемого теплоносителем  $V_{ж}$  к объему всей зоны нагрева  $V_{зп}$ , составлял 0,83. Зона конденсации при проведении экспериментов омывалась водой с температурой  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  и постоянным расходом  $4,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ .

## 3. Экспериментальная установка и методика проведения измерений

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1.

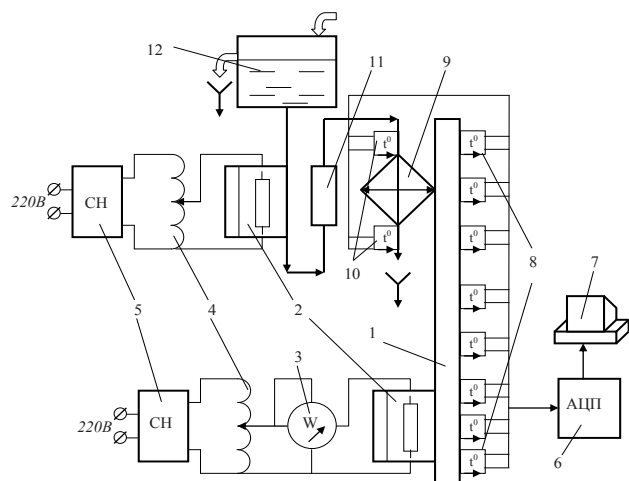


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – термосифон; 2 – омический нагреватель; 3 – ваттметр; 4 – лабораторный автотрансформатор; 5 – стабилизатор напряжения; 6 – аналогово-цифровой преобразователь; 7 – персональный компьютер; 8 – медь-константановые термопары для контроля температуры термосифона (8 шт); 9 – конденсатор типа «труба в трубе»; 10 – медь-константановые термопары охлаждающей воды (2 шт); 11 – ротаметр; 12 – бак напорный

При проведении эксперимента термосифон 1 устанавливался вертикально. К зоне испарения термосифона тепловой поток подводился с помощью омического нагревателя 2, подключенного к лабораторному трансформатору 4 через стабилизатор напряжения 5. Контроль величины тепловой нагрузки осуществлялся с помощью ваттметра 3. Температура по всей длине термосифона измерялась с помощью медь-константановых

новых термопар, которые были припаяны к внешней стенке термосифона (рис. 2). Сигнал от термопар 8 подавался на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 6 и далее на персональный компьютер 7. Система опроса показаний термопар позволяла фиксировать температуру в реальном времени с частотой 1Гц.

Для исключения тепловых потерь в окружающую среду термосифон полностью теплоизолировался базальтовым волокном с коэффициентом теплопроводности  $0,04 \text{ Вт/(м.К)}$ .

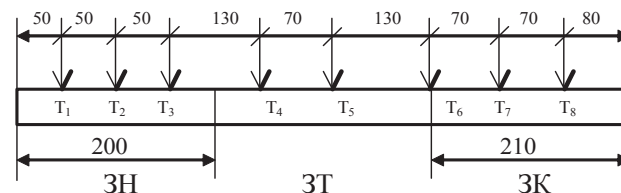


Рис. 2. Схема расположения термопар на внешней стенке термосифона

Отвод теплоты в верхней части термосифона осуществлялся с помощью конденсатора типа «труба в трубе» 9. Зона конденсации омывалась водой с расходом  $G \text{ (кг/с)}$ , который поддерживался постоянным с помощью напорного бака 12 и контролировался ротаметром 11. Температура воды на входе в конденсатор и на выходе из него измерялась двумя медь-константановыми термопарами 10, сигнал от которых также подавался на АЦП и далее на персональный компьютер. Температура воды на входе в конденсатор во время эксперимента поддерживалась постоянной с точностью  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  с помощью электронагревателя 3.

По показаниям термопар 10 ( $t_{вх}, t_{вых}$ ), ротаметра 11 и при известной удельной теплоемкости воды  $C_p$  рассчитывался реальный отводимый термосифоном тепловой поток по зависимости (1).

$$Q_{отв} = C_p \cdot G [\bar{t}_{вых}(\tau) - \bar{t}_{вх}(\tau)], \quad (1)$$

где:  $\bar{t}_{вых}(\tau), \bar{t}_{вх}(\tau)$  - средние во времени температуры выходящей и входящей воды в конденсаторе при установившемся режиме теплопередачи в термосифоне.

В ходе выполнения работы предполагалось, что температура наружной и внутренней стенок термосифона были равны. Поскольку в качестве материала стенок термосифонов была выбрана медь, то абсолютная погрешность определения температуры внутренней стенки даже при максимальных тепловых потоках не превышала  $0,05^{\circ}\text{C}$ .

Температура насыщения жидкости  $T_s$  определялась по данным термопар в адиабатной зоне, а температура начала кипения в зоне нагрева - по данным термопары  $T_1$ .

## 4. Результаты исследования

Сейчас общепризнанно, что причиной появления зародышей паровой фазы являются флуктуации плотности, которые вызваны беспорядочным тепловым движением молекул. Выводы классической молекулярно-кинетической теории [8,9,10] позволяют при-

йти к достаточно надежным и простым результатам. Молекулярно-кинетический подход к образованию паровой фазы основывается на предположении, что в жидкости существуют молекулы с разными энергетическими потенциалами. Некоторое количество молекул имеют энергию, значительно превышающую средний уровень. При столкновении таких молекул с молекулами, которые имеют меньшую энергию, происходит образование более крупных молекул, которые в дальнейшем способны присоединять другие менее активные молекулы. Энергия такого молекулярного образования повышается до некоторого критического уровня, и этот сгусток молекул переходит в состояние неустойчивого равновесия, которое может нарушиться в результате присоединения либо отдельной молекулы, либо при соударении с другой группой молекул. При подводе тепловой энергии к системе такое образование может играть роль зародыша паровой фазы. Преодолевая некий энергетический барьер, система из неустойчивого равновесия переходит в устойчивое. Этот переход происходит за очень короткий промежуток времени и носит взрывной характер.

Многочисленные экспериментальные и аналитические исследования показали, что образование паровой фазы (зародышей паровых пузырей) значительно легче осуществить на твердой поверхности нагрева, чем в объеме жидкости. То есть, в гетерогенных системах этот энергетический барьер значительно ниже, чем в гомогенных. В любом случае системе необходимо преодолеть некий энергетический барьер при переходе из состояния жидкой фазы в состояние с жизнеспособным зародышем на данном участке поверхности.

Вероятность начала парообразования на таком участке тем выше, чем ниже этот барьер. Приращение термодинамического потенциала системы  $\Delta\Phi$  вследствие появления парового пузырька объемом  $V$  с поверхностью  $F$  на теплообменной поверхности  $F_{ст}$  можно выразить формулой [11,12]:

$$\Delta\Phi = (f'' - f') \cdot V\rho'' + \sigma F \left[ 1 - (1 - \cos\theta) \frac{F_{ст}}{F} \right] \quad (2)$$

где:  $f''$  и  $f'$  - удельные термодинамические потенциалы Гиббса для паровой и жидкой фаз;  $F_{ст}$  - площадь теплообменной поверхности, соприкасающаяся с паровым пузырьком;  $\theta$  - краевой угол смачивания;  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения;  $\rho''$  - плотность пара.

Первый член уравнения (2) определяет работу, равную разности термодинамических потенциалов пара и жидкости. Второй член уравнения характеризует работу по созданию поверхностей раздела между тремя фазами - твердой, жидкой и газообразной. Величина этой работы зависит как от физико-химических свойств компонентов ( $\theta$ ), так и от геометрических  $F_{ст}/F$  особенностей рассматриваемого элемента поверхности. При идеальном смачивании  $\theta = 0$  ( $\cos \theta = 1$ ), работа образования поверхностей раздела будет определяться силами поверхностного натяжения и будет при этом максимальной. Идеальное несмачивание ( $\theta = 180^\circ$ ) приводит к минимальному значению работы образования новых поверхностей. При всяких других постоянных значениях краевого угла смачивания  $\theta$ , основную роль

будет играть соотношение площадей поверхности стенки  $F_{ст}$  и парового пузырька  $F$ . Чем большая часть поверхности пузырька  $F$  соприкасается с твердой поверхностью  $F_{ст}$ , тем работа образования новых поверхностей будет меньшей.

Существующие на греющей поверхности углубления, впадины и царапины являются наиболее возможными потенциальными центрами парообразования и они предпочтительнее, чем ровные участки и различные выступы [12,13,14]. Чаще всего на реальных технических поверхностях в углублениях существуют участки со слабыми молекулярными связями между жидкостью и поверхностью. Эти участки поверхности плохо смачиваются и являются потенциальными центрами парообразования. Наличие растворенных газов в жидкости также способствует активации центров парообразования.

В нашем случае, когда внутренняя поверхность термосифона перед заправкой теплоносителем подвергалась дегазации в вакуумной камере, максимально были удалены возможные адсорбированные молекулы воздуха в углублениях и трещинах. Теплоноситель также был тщательно дегазирован, поэтому вероятность наличия газовых включений внутри термосифона была минимальной.

Для возникновения парового пузырька на теплоотдающей поверхности необходимо, чтобы температура ее была выше температуры насыщения жидкости  $T_s$ . При этом возле теплоотдающей поверхности в жидкости формируется тепловой пограничный слой, толщину которого  $\delta$  в первом приближении можно определить по соотношению [13]

$$\delta = \sqrt{\pi a' \tau}, \quad (3)$$

где:  $a'$  - коэффициент температуропроводности жидкости;  $\tau$  - время от начала обогрева поверхности до возникновения первого зародыша паровой фазы.

Минимальный перепад температур между поверхностью нагрева и температурой насыщения  $T_s$ , в результате чего активизируется центр парообразования, можно определить по зависимости [13,14]

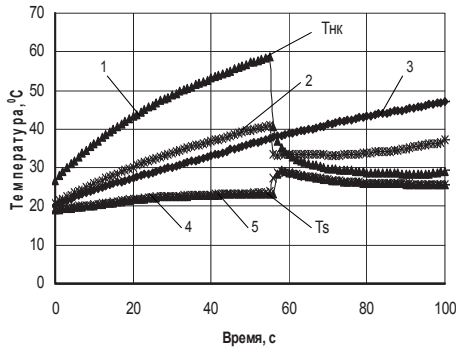
$$\Delta T_{нк} = T_{ст} - T_s = \frac{2\sigma T_s}{\gamma \rho'' R_{кр}}, \quad (4)$$

где:  $\gamma$  - теплота парообразования;  $R_{кр}$  - критический зародыш парового пузырька.

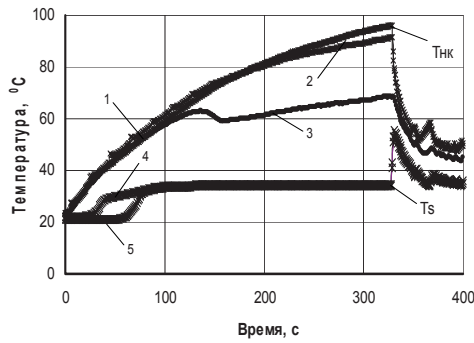
Критический радиус парового пузырька  $R_{кр}$  зависит от многих факторов, и определить его в реальных условиях довольно трудная задача, которая в настоящее время еще не решена. Поэтому экспериментальное определение перепада температур, при котором начинают активизироваться центры парообразования, является наиболее достоверным фактом.

На рис. 3 представлена зависимость температуры от времени для термосифонов, имеющих одинаковые геометрические характеристики, но с разными теплоносителями.

Как видно из рис. 3а три термодары ( $T_1, T_2, T_3$ ), установленные в зоне нагрева показывали разные значения, в то же время температура в зоне транспорта практически не изменялась. В зоне нагрева термодар  $T_3$  была установлена на уровне верхнего края теплоносителя, направленного в термосифон. В зоне на-



а)



б)

Рис. 3. Начало активации первых центров парообразования в зоне нагрева термосифона ( $d_{вн} = 9 \cdot 10^{-3} м$ ): а)  $Q = 25 Вт$ , теплоноситель — вода; б)  $Q = 25 Вт$ , теплоноситель — этанол; термопары в зоне нагрева: 1 -  $T_1$ ; 2 -  $T_2$ ; 3 -  $T_3$ ; термопары в зоне транспорта: 4 -  $T_4$ ; 5 -  $T_5$

грева, где располагалась термопара  $T_3$ , были созданы наилучшие условия отвода теплоты. Это объясняется тем, что в эту область из зоны конденсации стекала пленка теплоносителя, которая и охлаждала верхнюю часть зоны нагрева термосифона. В нижней части зоны нагрева условия образования паровых пузырей были затруднены в связи с тем, что тепловой пограничный слой в этой области только начинал формироваться. Поэтому для активации первого центра парообразования в зоне нагрева термосифона необходим был значительный перегрев. Причём в зоне расположения первой термопары температурный перепад был выше, чем в районе термопар  $T_2$  и  $T_3$ .

Если сопоставить данные по  $\Delta T_{нк}$  для воды и этанола (рис. 4), то видно, что активация первых центров парообразования у этанола происходит при более высоких перегревах, чем у воды. Причем данные для этанола автомодельны относительно плотности подводимого теплового потока в исследованном диапазоне нагрузок, в то время как для воды наблюдается рост  $\Delta T_{нк}$  с увеличением  $q$ .

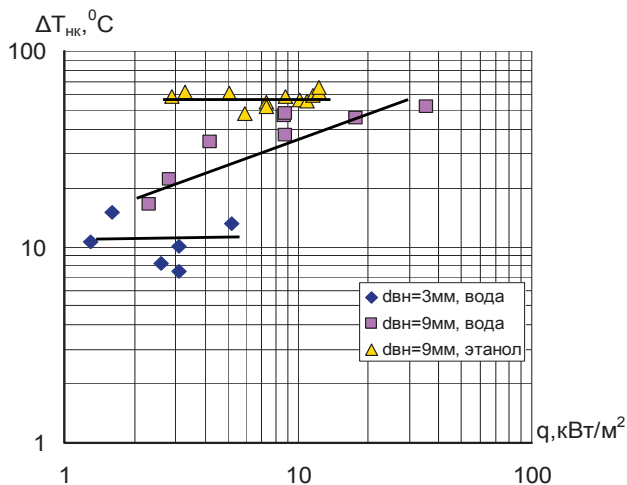


Рис. 4. Перегрев воды внутри термосифонов разных диаметров в зависимости от плотности теплового потока

Перегрев жидкости относительно температуры насыщения в термосифоне с  $d_{вн} = 3 \cdot 10^{-3} м$  также практически не зависит от плотности теплового потока. Значения  $\Delta T_{нк}$  лежат ниже, чем у термосифона с  $d_{вн} = 9 \cdot 10^{-3} м$ . Это,

по всей вероятности, сказывается влияние стесненных условий, поскольку внутренний диаметр термосифона соизмерим с диаметром зарождающегося парового пузыря. Действительно, если рассчитать по зависимости (4)  $R_{кр}$  для условий начала кипения в термосифоне с  $d_{вн} = 3 \cdot 10^{-3} м$ , то мы увидим, что  $R_{кр} = 0,06 \cdot 10^{-3} м$ , что в 25 раз меньше внутреннего радиуса зоны нагрева термосифона. Для  $d_{вн} = 9 \cdot 10^{-3} м$  расчет

дает  $R_{кр} = 0,014 \cdot 10^{-3} м$ , что в 450 раз меньше его внутреннего радиуса.

Важной характеристикой является время, в течение которого формируется тепловой пограничный слой в зоне нагрева до момента активации первого центра парообразования (рис. 5).

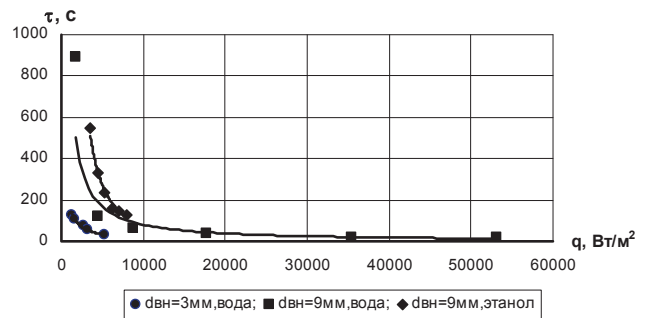


Рис. 5. Время формирования пограничного слоя в зависимости от плотности теплового потока

Как видно из рис. 5, существует влияние подводимой плотности теплового потока на время, в течение которого теплоноситель перегреется до состояния начала образования паровой фазы. Причем существует как влияние рода жидкости (вода, этанол), так и геометрических размеров зоны нагрева

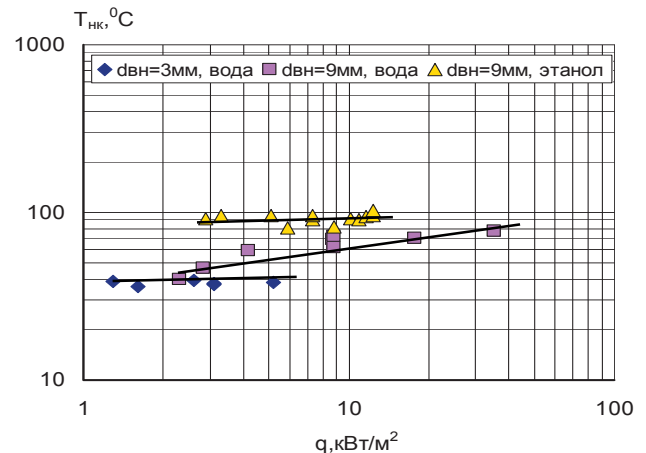


Рис. 6. Температура начала кипения в зависимости от плотности теплового потока

Абсолютные значения температур, до которых перегревается поверхность нагрева, необходимо знать в случае использования термосифонов в системах охлаждения реальных объектов. Как показано на рис. 6, уровень температур зоны нагрева достигает значений, при которых может выйти из строя охлаждаемое термосифоном устройство. Интересным является факт, что плотность теплового потока практически не оказывает влияния на температуру начала кипения жидкости для термосифонов  $d_{вн} = 3 \cdot 10^{-3}$  м, теплоноситель – вода и  $d_{вн} = 9 \cdot 10^{-3}$  м, теплоноситель – этанол. Для термосифона  $d_{вн} = 9 \cdot 10^{-3}$  м (теплоноситель-вода) при увеличении плотности теплового потока температура начала кипения растет незначительно.

## 5. Выводы

1. Проведенное исследование показало, что для выбранных типов термосифонов плотность теплового потока практически не влияет на температуру начала кипения теплоносителя в зоне нагрева.

2. Плотность теплового потока сильно влияет на время формирования теплового пограничного слоя. С увеличением интенсивности теплоподвода время до начала образования первых паровых пузырей существенно сокращается.

3. На температуру начала кипения влияет внутренний диаметр закрытого двухфазного термосифона. При увеличении внутреннего диаметра температура начала кипения возрастает.

## Литература

1. Безродный М.К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика/ М.К.Безродный, И.Л.Пиоро, Т.О.Костюк. – Киев: Факт. – 2005. – 704 с.
2. Безродный М.К. Двухфазные термосифоны в промышленной теплотехнике/ М.К.Безродный, С.С.Волков, В.Ф.Мокляк. –К: Вища школа. –1991. –75 с.
3. Кравец В.Ю. Влияние режимных факторов на теплопередающие характеристики двухфазных термосифонов/ В.Ю.Кравец, Е.Н.Письменный, В.И.Коньшин, Бехмард Голамреза// Збірник наук. праць СНУЯЕ та П, Севастополь. – 2010. – Вип. 4(36) – с. 41 – 49.
4. Кисина В.И. Границы и стадии поверхностного кипения воды/ В.И.Кисина, Н.В.Тарасова// Теплоэнергетика. – 2010. – №3 с. 9 – 22.
5. Кравец В.Ю. Пульсационные явления в закрытых двухфазных термосифонах/ В.Ю.Кравец, Е.Н.Письменный, В.И.Коньшин// Збірник наук. праць СНУЯЕ та П, Севастополь. – 2009.- Вип. 4(32) – с. 39 – 46.
6. Khazae I. Experimental investigation of effective parameters and correlation of geyser boiling in a two-phase closed thermosyphon/ I.Khazae, R.Hosseini, S.H. Noie// Applied Thermal Engineering. – 2010. – V. 30. – № 5. – p. 406 – 412.
7. Nisgoski A.R. Theoretical and experimental study of two-phase vertical and loop thermosyphons/ A.R.Nisgoski, A.S.Kupka, M.B.H.M-antelli, H.G.Landa // 12th Int. Heat Pipe Conf., May 19–24. – 2002, Moscow-Kostroma- Moscow.– P. 279–284.
8. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей/ Я.И.Френкель – М.: Наука. –1975. – с. 592.
9. Bernath L. Theory of Bubble Formation in Liquids/ L.Bernath// Ind. Eng. Chem. – 1952. –V.44, –№ 6, – p. 1310-1313.
10. Volmer M. Kinetik der Phasenbildung/ M.Volmer // Dresden und Leipzig. – 1938. – 220 p.
11. Лабунцов Д.А. Приближенная теория теплообмена при развитом пузырьковом кипении/ Д.А. Лабунцов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1963. – № 1. – с. 58-71.
12. Григорьев В.А. Кипение криогенных жидкостей/ В.А.Григорьев, Ю.М.Павлов, Е.В.Аметистов. – М.: Энергия. – 1977. – 288 с.
13. Присняков В.Ф. Кипение/ В.Ф. Присняков– Киев: Наук. Думка. – 1988. – 240 с.
14. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении/ В.И. Толубинский – Киев: Наук. думка. 1980. – 316 с.