

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ В СВОБОДНОМ ОБЪЕМЕ НАНОФЛЮИДА ИЗОПРОПАНОЛ / Al_2O_3

У статті представлені результати дослідження методичних особливостей при вивченні процесів кипіння у вільному об'ємі нанofлюїда ізопропанол/ Al_2O_3 . Запропонована конструкція установки для аналізу таких характеристик нанofлюїдів, як їх стабільність та концентрація наночастинок при різних параметрах. Проведено дослідження впливу концентрації нанofлюїда на його стабільність і гідродинамічний радіус наночастинок

Ключові слова: кипіння, коефіцієнт тепловіддачі, нанofлюїд, стабільність, гідродинамічний радіус, концентрація

В статье представлены результаты исследования методических особенностей при изучении процессов кипения в свободном объеме нанofлюида изопропанол/ Al_2O_3 . Предложена конструкция установки для анализа таких характеристик нанofлюидов как их стабильность и концентрация наночастиц при различных параметрах. Проведено исследование влияния концентрации нанofлюида на его стабильность и гидродинамический радиус наночастиц

Ключевые слова: кипение, коэффициент теплоотдачи, нанofлюид, стабильность, гидродинамический радиус, концентрация

В. П. Железный

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: vzhelzny@mail.ru

Ю. В. Семенюк

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: suv1902@ukr.net

В. Я. Гоцульский

Кандидат физико-математических наук, доцент

Кафедра общей и химической физики

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

ул. Пастера, 27, г. Одесса, Украина, 65023

E-mail: vygot@onu.edu.ua

А. Г. Никулин

Аспирант, младший научный сотрудник*

E-mail: arteomng@gmail.com

Н. А. Шимчук

Аспирант, младший научный сотрудник*

E-mail: nikola_collizyey@ukr.net

Н. Н. Лукьянов

Аспирант*

E-mail: nikolai_lukyuanov@ukr.net

*Кафедра теплофизики и прикладной экологии

Одесская национальная академия пищевых технологий

ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039

1. Введение

Различное энергетическое оборудование, такое как: сверхкритические котлы, теплообменные аппараты и ядерные реакторы, холодильное оборудование, тепловые насосы и тепловые трубы, нуждаются в интенсификации протекающих в них теплообменных процессов. Повышение энергетической эффективности при тепловом регулировании перечисленных выше устройств возможно тремя способами.

Во-первых, простым увеличением площади теплопередающей поверхности. Однако такой подход приведет к увеличению материалоемкости, стоимости оборудования, а, следовательно, и уменьшению конкурентоспособности производимого оборудования.

Во-вторых, модификацией теплообменных поверхностей аппаратов (микроструктурированные поверхности, микроканалы, микроканальные тепло-

обменники, микроструи, нанесение на поверхности теплообменных аппаратов гидрофобных покрытий и т. д.). Однако в работах [1, 2] отмечается, что обычное увеличение площади поверхности теплообмена и микроканальные технологии не всегда являются альтернативным решением, например, для теплового регулирования нового поколения полупроводников и оптоэлектронных устройств. Стоит также учитывать увеличение стоимости теплообменного оборудования использующего указанные технологии, а также возможность засорения профиля микроканалов и структурированных поверхностей, увеличения гидродинамического сопротивления теплообменников.

Третье направление интенсификации теплообмена в аппаратах связано с модификацией уже применяемых теплоносителей или рабочих тел для различного рода оборудования. В рамках этого направления предлагается использовать нанofлюиды (суспензии

твердых частиц nano размеров (до 100 нм) в базовой жидкости). Как показывают выполненные различными авторами исследования, даже незначительные примеси наночастиц различных металлов, их окислов, углеродные нанотрубки, фуллерены и т. п. способствуют значительному увеличению коэффициента теплоотдачи при различных процессах теплообмена.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Как уже было отмечено выше, нанофлюиды обладают большим потенциалом для улучшения теплопередачи и энергетической эффективности в системах теплового регулирования [3, 4].

Выполненный анализ опубликованных на сегодняшний день работ показывает, что были обнаружены следующие ключевые особенности теплопередачи в нанофлюидах:

- большая теплопроводность нанофлюидов по сравнению с базовой жидкостью [5];
- увеличение, а иногда и ухудшение теплопередачи при однофазном потоке [6, 7];
- увеличение, а в некоторых случаях, и ухудшение теплопередачи при пузырьковом кипении в свободном объеме [8, 9];
- более высокая критическая плотность теплового потока при кипении в свободном объеме [10];
- наночастицы могут оседать на теплопередающих поверхностях и образовывать слой, который морфологически зависит от материала наночастицы [11].

Таким образом, можно констатировать, что исследование процессов теплообмена в нанофлюидах находится на ранней стадии. Разнообразие получаемых эффектов обусловлено комплексным влиянием многих факторов: взаимодействие наночастиц с теплопередающими поверхностями, физические свойства, размер и концентрация, материала наночастиц, метод получения нанофлюида (одноступенчатый, двухступенчатый), применение поверхностно активных веществ (ПАВ) и т. д. При этом, как неоднократно отмечалось рядом авторов, например [12], стабильность исследуемых нанофлюидов является решающим фактором в наблюдаемых эффектах изменения коэффициентов теплоотдачи. То есть задачи устойчивости нанофлюидов становятся ключевой проблемой в физической интерпретации полученных результатов при изучении теплофизических свойств и процессов теплообмена. Несмотря на то, что ряд авторов, например [12], уделяют этому ключевому вопросу значительное внимание, проблема изучения устойчивости нанофлюидов (коллоидных гетерогенных систем на основе технических жидкостей) до сих пор остается не решенной.

В качестве примера авторы предлагаемой статьи рассматривают результаты исследования нанофлюидов на основе изопропилового спирта.

3. Влияние наночастиц на процесс кипения нанофлюидов

На кафедре теплофизики и прикладной экологии Одесской национальной академии пищевых тех-

нологий была создана экспериментальная установка для изучения процесса пузырькового кипения чистых жидкостей, растворов хладагент/масло и нанофлюидов. Установка реализует метод циркуляции вещества в замкнутом контуре. В качестве рабочего участка (поверхностью нагрева) используется тонкостенный (толщина стенки 0,1 мм) капилляр из нержавеющей стали диаметром 2 мм и длиной 730 мм, описание установки, методика эксперимента и результаты тестовых экспериментов подробно представлены в работе [13].

На данном экспериментальном стенде проведены исследования влияния наночастиц Al₂O₃ на интенсивность кипения изопропанола. Выбор объекта исследования обусловлен тем, что изопропанол образует стабильные во времени растворы с наночастицами Al₂O₃ в широком интервале концентраций. При проведении исследований использовался выпускаемый промышленностью нанофлюид (CAS 70-21-29). По информации производителя размер наночастиц Al₂O₃ составлял не более 50 нм. Образцы для проведения исследований были получены путем разбавления этого нанофлюида чистым изопропиловым спиртом (CAS 67-63-0). Полученные данные о кривых кипения на двух изотермах 60 и 75 °С для чистого изопропанола и нанофлюидов с массовой концентрацией наночастиц Al₂O₃ 0,05 и 0,1 % приведена на рис. 1 и 2.

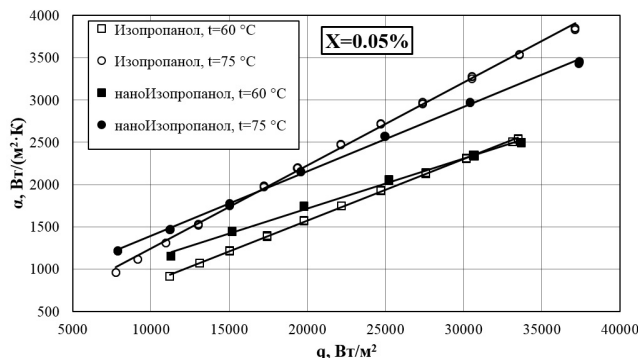


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от плотности теплового потока q

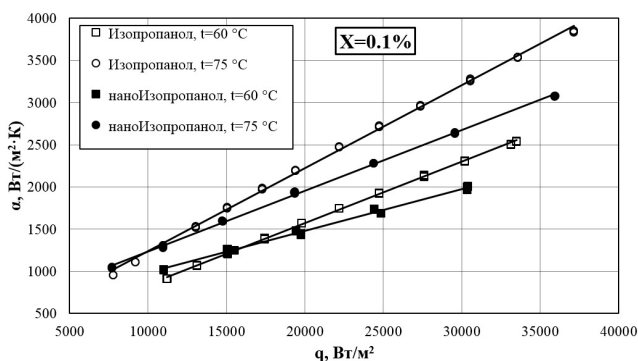


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от плотности теплового потока q

Анализ приведенных кривых кипения показывает, что наличие наночастиц в жидкости может привести к повышению коэффициента теплоотдачи при кипении на (10–26) %. Однако этот эффект наблюдается

только при невысоких плотностях теплового потока и уменьшается с повышением температуры и концентрации наночастиц. При высоких плотностях теплового потока присутствие наночастиц в базовой жидкости приводит к снижению интенсивности теплообмена. Такое поведение кривых кипения, с одной стороны, подтверждается противоречивыми результатами исследований других авторов [14], а с другой – требует своего пояснения.

Существует несколько факторов, которые оказывают сильное влияние на интенсивность процессов теплообмена при кипении нанофлюидов в свободном объеме. К их числу можно отнести изменение устойчивости нанофлюидов при увеличении температуры, а также изменение гидродинамического радиуса наночастиц при различных концентрациях нанофлюида.

При исследовании влияния наночастиц Al_2O_3 на коэффициент теплоотдачи при кипении, было обнаружено их оседание на поверхности нагревателя. Для исследования процесса оседания наночастиц в процессе кипения нанофлюида на поверхности нагревателя была изготовлена специальная установка. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

В образец нанофлюида погружался плоский нагреватель 1, который был изготовлен из листовой нержавеющей стали. Толщина нагревателя составляла 0,1 мм. С помощью подводящих проводов 2 и клемм 3 нагреватель прикрепляется к медным электрическим проводам большого диаметра (3 мм) 11. Место соединения между колбой 15, конденсатором 10 и переходником 14 герметизировалось силиконом. Воздух из внутреннего объема измерительной ячейки откачивался через вентиль 8 вакуумным насосом 7. От источника питания 6 на нагреватель подавалась нагрузка, мощность которой регулировалась в процессе выполнения исследований. Температура кипящего образца измерялась с помощью ртутного лабораторного термометра 5, чувствительная часть которого закреплена на внешней поверхности колбы. Для уменьшения теплообмена с окружающей средой колба и термометр были изолированы слоем теплоизоляции 13. Температура кипения образца нанофлюида регулировалась установлением определенного расхода охлаждающей жидкости, прокачиваемой через конденсатор 10.

Были исследованы образцы нанофлюида с концентрацией наночастиц 0,05, 0,1 и 0,5 масс. %. Нанофлюиды готовились по описанной выше технологии. На нагреватель подавалось нагрузка 52 Вт. Внутри колбы поддерживалась температура кипения 55 °С.

В результате эксперимента получены образцы нагревателя, на которых наблюдалось оседание наночастиц. С помощью оптического микроскопа были получены фотографии мест оседания наночастиц (рис. 4). Из приведенных фотографий следует, что наиболее интенсивно наночастицы оседают в местах центров парообразования, что согласуется с гипотезой предложенной в работе [11]. Авторы этой статьи пришли к заключению, что причиной оседания наночастиц на поверхности теплопередающей поверхности является испаряющийся микрослой нанофлюида в основании парового пузырька. Из приведенных фотографий на рис. 4, а, б следует, что оседание наночастиц имеет различный характер на верхней и нижней частях нагревателя. Не отрицая полученные в статье [11] выводы

о механизме оседания наночастиц на поверхности нагревателя, следует заметить, что оседание наночастиц, видимо, связано с разрушением структуры мицелл в гетерогенных нанофлюидах в местах формирования пузырьков пара.

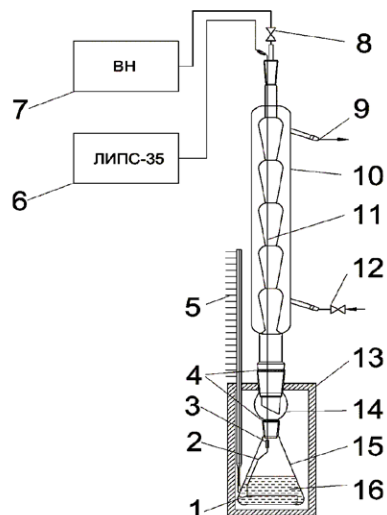


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования процесса осаждения наночастиц на поверхность нагревателя: 1 – исследуемый образец (нагреватель); 2 – электрические провода; 3 – клеммы; 4 – место герметизации силиконом; 5 – лабораторный ртутный термометр; 6 – источник питания; 7 – вакуумный насос; 8 – вентиль; 9 – выход охлаждающей жидкости; 10 – конденсатор; 11 – токоподводящие провода; 12 – вентиль для регулировки расхода охлаждающей жидкости; 13 – теплоизоляция; 14 – переходник с колбы на конденсатор; 15 – колба; 16 – нанофлюид

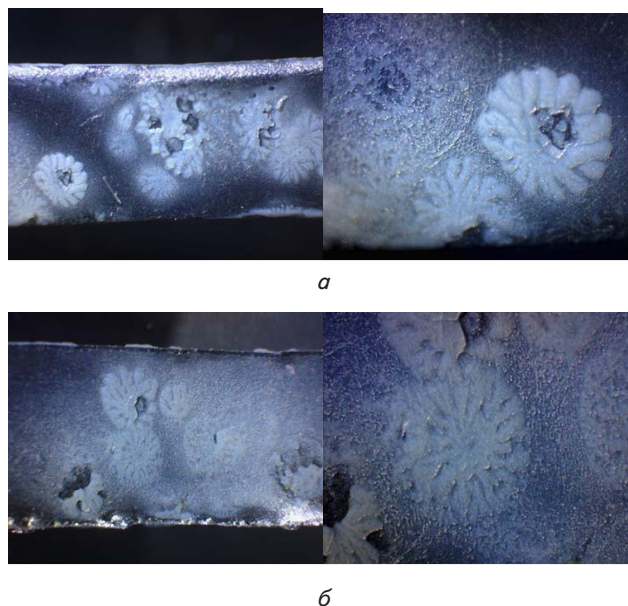


Рис. 4. Фотографии поверхности нагревателей после процесса кипения нанофлюида ($x=0.05\%$): а – верхняя часть нагревателя; б – нижняя часть нагревателя

Исходя из полученных результатов, можно прийти к заключению, что при разработке методики проведения исследований теплообмена при кипении нанофлюидов необходимо включать этапы контроля исследуемого образца нанофлюида и поверхности нагревателя до и после проведения экспериментов. Так, например, в работе [15] было показано, что даже разбавление стабильных (коммерческих) нанофлюидов с большой концентрацией наночастиц может приводить к существенному изменению размера частиц от заявленных производителем. А в работе [9] было показано, что размер частиц Au после проведения эксперимента (кипение нанофлюида R141b/Au в свободном объеме) увеличился с 3 до 110 нм.

С учетом изложенного, целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование гидродинамического радиуса наночастиц в нанофлюидах изопропанол/Al₂O₃ при помощи установки реализующей принцип динамического светорассеяния DLS.

Кроме того, в предлагаемой работе были исследованы временная и температурная зависимости устойчивости нанофлюида изопропанол/Al₂O₃ на установке реализующей принцип турбидиметра. Полученные данные позволили получить градуировочную зависимость концентрации наночастиц от количества пропускаемого через оптическую ячейку, заполненную нанофлюидом света.

4. Исследование характеристик нанофлюидов

Теплофизические свойства нанофлюидов и их стабильность в значительной мере определяют перспективу практического использования нанотехнологий в энергетике. Эти характеристики нанофлюидов в значительной мере зависят от величины гидродинамического радиуса наночастиц и их концентрации в базовой жидкости.

В предлагаемой работе методами динамического рассеяния света (лазерной корреляционной спектроскопии) [16, 17] авторами были определены характерные размеры оптических неоднородностей в нанофлюидах изопропанол/Al₂O₃. Измерения проводились на оригинальной установке методом гомодинамирования [18].

Характерные размеры определялись по корреляционной функции интенсивности рассеянного света в гауссовом приближении

$$G^{(2)}(\tau) = \langle I(0)I(\tau) \rangle = A + B \exp(-2Dq^2\tau) = A + B \left| \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_c}\right) \right|^2, \tag{1}$$

где $D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$ - коэффициент диффузии Смолуховского-Эйнштейна, $q = \frac{4\pi n}{\lambda_0} \sin \frac{\Theta}{2}$ - волновой вектор рассеяния, Θ - угол рассеяния, λ_0 - длина волны падающего излучения, n - показатель преломления раствора.

Величина характерного размера частиц определялась как гидродинамический радиус [17]

$$r = \frac{8\pi n^2 \sin^2\left(\frac{\Theta}{2}\right) k_B T \tau_c}{3\eta \lambda_0^2}, \tag{2}$$

здесь η - коэффициент динамической вязкости,

$$\tau_c = \frac{1}{Dq^2} - \text{время корреляции полученное из (1),}$$

k_B, T - постоянная Больцмана и температура раствора соответственно.

Необходимо отметить, что по формуле (2) гидродинамический радиус наночастиц определяется из условия, что они имеют сферическую форму и перемещаются в базовой жидкости без взаимодействия друг с другом. Проведенные исследования показывают, что реальный радиус наночастиц меньше гидродинамического (рис. 5).

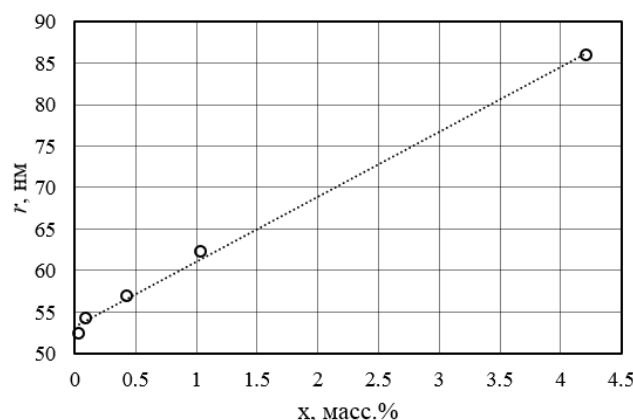


Рис. 5. Зависимость гидродинамического радиуса от массовой доли наночастиц

Экспериментальная установка для исследования стабильности нанофлюидов представлена на рис. 6. В качестве источника света был использован лазер 1 (длина волны 650 нм). Луч лазера, проходя через оптическую ячейку 2 (стеклянное цилиндрическое кольцо, уплотняемое по торцам плоскопараллельными стеклами с длиной оптического пути l), содержащую исследуемый нанофлюид, попадает на фотодиод 3. Для исключения попадания на фотодиод рассеянного света фотодиод 3 был помещен в трубку 4, покрытую изнутри материалом с высоким коэффициентом поглощения. С целью получения параллельного пучка света диаметром 2 мм были использованы оптические щели 5. Питания лазера и фотодиода осуществлялось стабилизированными источниками питания 6. Показания фотодиода (в вольтах) регистрировались мультиметром 7 (RIGOL DM3064). Для поддержания необходимой температуры оптическую ячейку помещают в термостат 8, в качестве которого служит массивный цилиндрический медный блок, через который прокачивается теплоноситель из вспомогательного термостата.

Методика определения стабильности нанофлюидов включала несколько этапов. Вначале измерялся максимальный сигнал, получаемый от фотодиода – U_{max} (V), без установки образца 2. После чего устанавливался образец 2 и измерялся сигнал – U_{nano} (V). С учетом возможных изменений характеристик ла-

зера величиною характеризующей стабильность нанофлюида предлагается использовать отношение – $U_{ratio} = U_{nano} / U_{max}$.

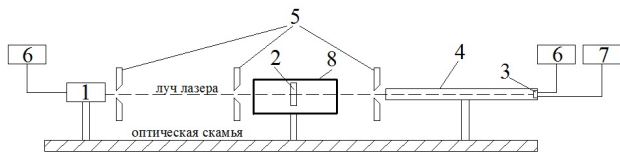


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для определения стабильности нанофлюидов: 1 – лазер; 2 – оптическая ячейка; 3 – фотодиод; 4 – трубка; 5 – оптические щели; 6 – стабилизированные источники питания; 7 – мультиметр

Для исключения влияния на измеряемые величины параметров источника света при определении концентрационной зависимости нанофлюидов величина U_{ratio} , рассчитывалась как $U_{ratio} = U_{nano} / U_{base}$ где величина U_{base} определялась при прохождении света через оптическую ячейку содержащую чистую базовую жидкость (изопропанол). Результаты проведенных исследований стабильности нанофлюидов представлены на рис. 7 и 8.

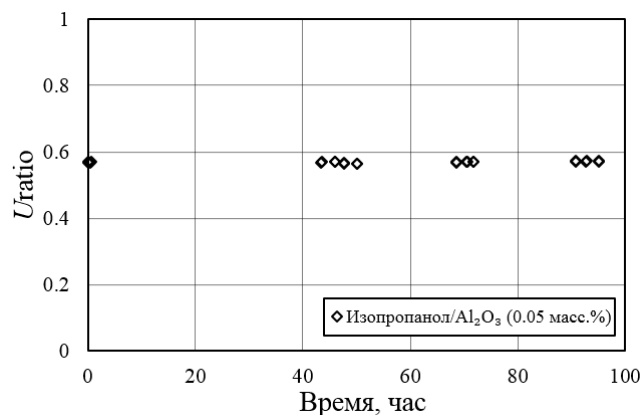


Рис. 7. Характеристика стабильности нанофлюида изопропанол/ Al_2O_3 во времени (длина оптического пути ячейки $l = 100$ мм)

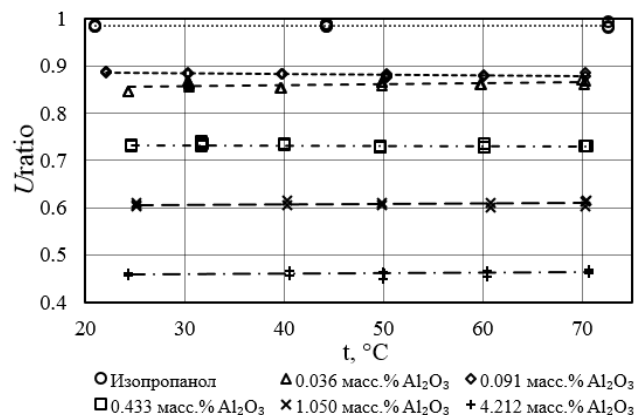


Рис. 8. Характеристики стабильности нанофлюида изопропанол/ Al_2O_3 в зависимости от температуры (длина оптического пути ячейки $l = 4,5$ мм)

Как следует из информации, приведенной на рис. 7, нанофлюид изопропанол/ Al_2O_3 остается стабильным в течении всего времени проведения исследований. Кроме того, проведенные исследования влияния температуры (до $70^\circ C$) на величину U_{ratio} (рис. 8) также свидетельствуют о стабильности рассматриваемых образцов нанофлюидов изопропанол/ Al_2O_3 , имеющих концентрацию до 4,2 масс. %. Этот вывод подтверждают приведенные на рис. 9 фотографии образцов, которые находились длительное время в термостате при температуре $75^\circ C$.

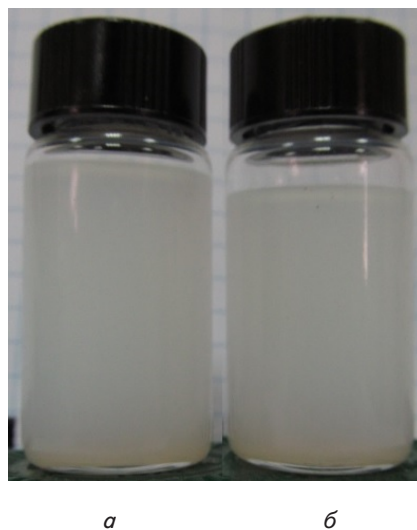


Рис. 9. Образцы нанофлюида изопропанол/ Al_2O_3 ($x = 4,2$ масс. %): а – сразу после приготовления; б – после воздействия $t = 75^\circ C$ в течение 100 часов

Исходя из полученных результатов, можно сделать по крайней мере два вывода. Во-первых, увеличение температур нанофлюидов, при которых проводились исследования коэффициента теплоотдачи, не могут рассматриваться причиной потери устойчивости нанофлюидов в процессе кипения.

Во вторых, исследования величины гидродинамического радиуса наночастиц и изучение характеристик стабильности наофлюидов – $U_{ratio} = U_{nano} / U_{base}$ позволяет получить градуировочную зависимость массовой доли наночастиц от U_{ratio} (рис. 10 и 11).

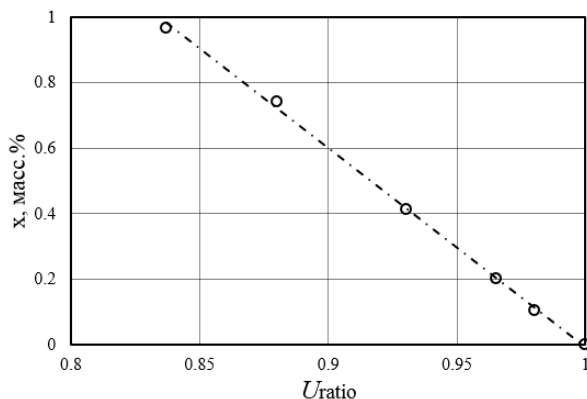


Рис. 10. Зависимость массовой доли наночастиц Al_2O_3 в изопропанолу от величины U_{ratio} (длин оптического пути ячейки $l = 10$ мм)

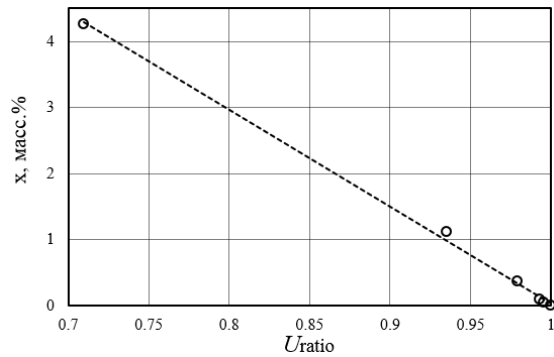


Рис. 11. Зависимость массовой доли наночастиц Al_2O_3 в изопропанолe от величины U_{ratio} (длина оптического пути ячейки $l = 4,5$ мм)

Наличие таких градуировочных зависимостей значительно облегчит процедуру анализа получаемых экспериментальных данных при исследовании теплофизических свойств нанofлюидов, а также интерпретацию полученных данных при исследовании процессов теплообмена.

5. Выводы

Представленные результаты исследования процессов кипения нанofлюидов показывают, что примеси наночастиц в базовой жидкости приводят к значи-

тельному изменению коэффициентов теплоотдачи, что свидетельствует о большем прикладном потенциале применения нанотехнологий в теплообменном оборудовании.

Однако для корректной интерпретации полученных результатов о влиянии наночастиц на свойства гетерогенных коллоидных систем и процессы теплообмена при их кипении необходим корректный учет изменения таких характеристик нанofлюида, как: концентрация и стабильность нанofлюидов, размер гидродинамического радиуса наночастиц.

Полученные в данной работе данные свидетельствуют об изменении гидродинамического радиуса частиц Al_2O_3 от 53 до 86 нм при повышении массовой доли наночастиц в изопропанолe от 0,036 до 4,2 масс. %.

Проведенные эксперименты по определению стабильности нанofлюида показывают, что система остается стабильной во всем интервале времени проведения эксперимента (100 часов), температур (20–70 °C) и массовых долей наночастиц (0,036–4,2 масс. %).

Одной из возможных причин нарушения стабильности нанofлюидов при кипении может являться разрушение гетерогенных мицелл на поверхности нагревателя. Поэтому при изучении процессов кипения нанofлюидов в свободном объеме и корректной интерпретации полученных данных необходимо учитывать изменение стабильности и концентрации объектов исследования, а так же изменение свойств теплопередающей поверхности при оседании на ней материала наночастиц.

Литература

- Duncan, A. B. Review of Microscale Heat Transfer [Text] / A. B. Duncan, G. P. Peterson // *Appl Mech Rev.* – 1994 – Vol. 47(9). – P. 397–428.
- Majumdar, A. Microscale energy transport in solids. In “Microscale Energy Transport” [Text] / C. L. Tien, A. Majumdar, F. Gerner, eds. – Taylor & Francis. – Washington, DC, USA, 1998. – 94 p.
- Naphon, P. Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency [Text] / P. Naphon, P. Assadamongkol, T. Bororak // *Int Commun Heat Mass Transfer.* – 2008. – Vol. 35. – P. 1316–1319.
- Huminic, G. Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphons using nanofluids [Text] / G. Huminic, A. Huminic // *Exp Thermal Fluid Sci.* – 2011. – Vol. 35. – P. 550–557.
- Nikitin, D. Surface tension, viscosity, and thermal conductivity of nanolubricants and vapor pressure of refrigerant/nanolubricant mixtures [Text] / D. Nikitin, V. Zhelezny, V. Grusko, D. Ivchenko // *Estern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2012. – Vol. 5, № 5 (59). – P. 12–17.
- Pak, B. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles [Text] / B. Pak, Y. Cho // *Exp Heat Transf.* – 1998. – Vol. 11(2). – P. 151–170.
- Wen, D. Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications [Text] / D. Wen, Y. Ding // *Int J of Heat and Fluid Flow.* – 2005. – Vol. 26(8). – P. 55–64.
- Trisaksri, V. Nucleate pool boiling heat transfer of TiO_2 -R141b nanofluids [Text] / V. Trisaksri, S. Wongwises // *Int J Heat Mass Transf.* – 2009. – Vol. 52. – P. 1582–1588.
- Yang, C. Y. Effect of nano-particles for pool boiling heat transfer of refrigerant R141b on horizontal tubes [Text] / C. Y. Yang, D. W. Liu // *Int J Microscale Nanoscale Thermal Fluid Transport Phenomena.* – 2010. – Vol. 1 (3). – P. 233–243.
- You, S. M. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool-boiling heat transfer [Text] / S. M. You, J. H. Kim, K. H. Kim // *Appl Phys Lett.* – 2003. – Vol. 83. – P. 3374–3376.
- Kwark, S. M. Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids [Text] / S. M. Kwark, R. Kumar, G. Moreno // *Int J Heat Mass Transf.* – 2010. – Vol. 53. – P. 972–981.
- Choi, C. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants [Text] / C. Choi, H. S. Yoo, J. M. Oh // *Current Appl Phys.* – 2008. – Vol. 8. – P. 710–712.
- Никулин, А. Г. Экспериментальная установка для исследования процессов кипения чистых жидкостей и растворов в свободном объеме [Текст] / А. Г. Никулин, Ю. В. Семенюк, Н. Н. Лукьянов // *Холодильная техника и технология.* – 2013. – Т. 4 (144). – С. 12–18.

14. Kedzierski, M. A. Effect of CuO nanolubricant on R134a pool boiling heat transfer [Text] / M. A. Kedzierski, M. Gong // Int J Refrig. – 2009. – Vol. 32. – P. 791–799.
15. Utomo, Adi T. Experimental and theoretical studies of thermal conductivity, viscosity and heat transfer coefficient of titania and alumina nanofluids [Text] / T. Utomo Adi, H. Poth, Phillip T. Robbins, Andrzej W. Pacek // Int J Heat Mass Transf. – 2012. – Vol. 55. – P. 7772–7781.
16. Ахманов, С. А. Введение в статистическую радиофизику и оптику [Текст] / С. А. Ахманов, Ю. Е. Дьяков, А. С. Чиркин. – М.: Наука, 1981. – 640 с.
17. Cummins, H. Z. Photon correlation and light beating spectroscopy [Text] / H. Z. Cummins, E. R. Pike. – England: Great Malvern, Royal Radar Establishment, 1974. – 583 p.
18. Заремба, В. Г. Визначення моментів старших кореляційних функцій електромагнітних полів при однокотковій реєстрації [Текст] / В. Г. Заремба, Г. І. Салістра, В. Я. Гоцульський, В. Е. Чечко // УФЖ. – 1995. – Т. 40(6). – С. 638–639.

Приводяться експериментальні дані по коефіцієнтам тепловіддачі в зоні випаровування закритих двофазних термосифонів з внутрішніми діаметрами 5 мм і 9 мм, довжиною 700 мм. В якості теплоносіїв використовувалися вода і етанол. Отримана емпірична залежність інтенсивності тепловіддачі в зоні випаровування термосифона від густини теплового потоку при зміні кута нахилу. Показано вплив типу теплоносія, а також геометричних і режимних параметрів на теплопередаючі характеристики термосифонів

Ключеві слова: термосифон, зона випаровування, зона конденсації, тепловий потік, теплоносій, коефіцієнт тепловіддачі, кут нахилу, ступінь заповнення

Приводятся экспериментальные данные по коэффициентам теплоотдачи в зоне испарения закрытых двухфазных термосифонов с внутренними диаметрами 5 мм и 9 мм, длиной 700 мм. В качестве теплоносителей использовались вода и этанол. Получена эмпирическая зависимость интенсивности теплоотдачи в зоне испарения термосифона от плотности теплового потока при изменении угла наклона. Показано влияние типа теплоносителя, а также геометрических и режимных параметров на теплопередающие характеристики термосифонов

Ключевые слова: термосифон, зона испарения, зона конденсации, тепловой поток, теплоноситель, коэффициент теплоотдачи, угол наклона, степень заполнения

УДК 621.565.83

ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОТДАЧИ В ЗОНЕ ИСПАРЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ТЕРМОСИФОНОВ

В. Ю. Кравец

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

В. И. Коньшин

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: kravetzkpi@ukr.net

Н. С. Ванеева*

Кафедра атомных электрических

станций и инженерной теплофизики

Национальный технический

университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

1. Введение

Системы охлаждения на основе испарительно-конденсационного цикла нашли широкое применение в различных устройствах теплообменного оборудования. Основным преимуществом их является обеспечение высокой интенсивности теплоотдачи в областях подвода и отвода тепловой энергии. Этого добиваются путем изменения агрегатного состояния вещества (теплоносителя), находящегося внутри замкнутого объема. В зоне подвода теплоты это процесс генерации паровой фазы (кипение), а в зоне отвода теплоты – обратный процесс (конденсация). Существенным также является возврат конденсата в зону подвода теплоты, что возможно осуществить различными способами (силы гравитации, капиллярные силы, механический перенос и др.).

Одними из эффективных элементов систем охлаждения, использующих принцип испарительно-кон-

денсационного цикла, в настоящее время являются замкнутые двухфазные термосифоны различных конструкций [1–3]. Возврат конденсата в них в основном обеспечивается за счет сил гравитации, поэтому основное применение они нашли при работе в вертикальном положении или под некоторым углом к горизонту. Преимущества их по сравнению с другими видами элементов систем охлаждения заключаются в высоких теплопередающих способностях и в простоте изготовления. Однако на теплопередающие характеристики термосифонов влияет большое количество факторов. Это, прежде всего, количество заправленного теплоносителя и его теплофизические свойства, общая длина, внутренний диаметр, длины зон нагрева (испарения) и конденсации и условия охлаждения зоны конденсации. Также в термосифонах без вставок (ординарные термосифоны) процесс транспорта теплоты сопровождается периодическими выбросами теплоносителя