

УДК 536.24

Методические особенности экспериментального изучения процессов кипения нанофлюидов в свободном объеме

*Д-р техн. наук В. П. ЖЕЛЕЗНЫЙ¹, канд. техн. наук Ю. В. СЕМЕНЮК²,
А. Г. НИКУЛИН³, Н. Н. ЛУКЬЯНОВ⁴*

¹vzhelezny@mail.ru, ²suv1902@ukr.net, ³arteomng@gmail.com, ⁴nikolai_lukyanov@ukr.net

Одесская национальная академия пищевых технологий

Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики

имени В. С. Мартыновского

65082, Украина, Одесса, ул. Дворянская, 1/3

Одним из современных методов интенсификации теплообмена в аппаратах холодильного оборудования является применение новых рабочих тел с более совершенными теплопередающими свойствами, например, нанофлюидов.

Авторами статьи приведены результаты комплексного исследования особенностей экспериментального изучения процессов кипения в свободном объеме нанофлюидов, в состав которых входят не только наночастицы, но и сурфактанты. Показано, что на интенсивность процессов кипения в нанофлюидах оказывают влияние различные факторы, такие как концентрация наночастиц и сурфактантов, плотность теплового потока, температура кипения и устойчивость объектов исследования. Вклад каждого из указанных факторов зависит от параметров, при которых проводится исследование процессов кипения. Поэтому выводы и оценки перспективности применения нанофлюидов в холодильной технике не могут носить общий характер, а должны быть конкретизированы к условиям ее эксплуатации.

Ключевые слова: кипение в свободном объеме, коэффициент теплоотдачи, диаметр отрывного пузырька, раствор хладагент/масло, нанофлюид, сурфактант.

Methodical peculiarities of the pool boiling processes investigations of nanofluids

*D. Sc. V. P. ZHELEZNY¹, Ph. D. Yu. V. SEMENUK²,
A. G. NIKULIN³,
M. M. LUKIANOV⁴*

¹vzhelezny@mail.ru, ²suv1902@ukr.net,

³arteomng@gmail.com, ⁴nikolai_lukyanov@ukr.net

Odessa National Academy of Food Technologies

Institute of refrigeration, cryotechnology and ecoenergetics named after V. S. Martynovsky

65082, Ukraine, Odessa, Dvoryanskaya str., 1/3

One of the modern methods of heat exchange intensification in the refrigeration units is application of new working media with better properties of heat transfer e. g. nanofluids.

This paper presents the results of comprehensive experimental study of nanofluids during pool boiling processes, which include not only the nanoparticles, but surfactants also. It is shown that the boiling performance of nanofluids depends on such factors as concentration of nanoparticles and surfactant, heat flux densities, boiling temperature and stability of nanofluids. The contribution of each factor depends on the conditions in which the boiling processes occur. Therefore, the conclusions about the application prospects of nanofluids in refrigeration cannot be made in general, but must be specified to its operation conditions.

Keywords: pool boiling, heat-transfer coefficient, bubble departure diameter, refrigerant/oil solution, nanofluid, surfactant.

Введение

Применительно к парокомпрессорным холодильным машинам, важной научной проблемой остается исследование теплоотдачи при кипении реальных рабочих тел (РРТ) — растворов хладагент/масло (РХМ). Примеси компрессорного масла в РРТ оказывают существенное влияние на интенсивность теплообмена. Сложность создания теоретически обоснованных методов расчета коэффициента теплоотдачи при кипении РХМ, которые позволяли бы оценить влияние примесей масла в рабочем теле на интенсивность теплоотдачи, обусловлена недостаточной изученностью происходящих при кипении процессов [1–6].

Одним из современных методов интенсификации теплообмена в аппаратах холодильного оборудования является применение новых рабочих тел с более совершенными теплопередающими свойствами, например, нанофлюидов. Как показывает проведенный анализ, нанофлюиды обладают большим потенциалом для интенсификации теплообмена в аппаратах холодильного оборудования, повышения его энергетической эффективности [7]. Следует выделить несколько недостаточно изученных на сегодня особенностей передачи теплоты в нанофлюидах: большая теплопроводность нанофлюидов по сравнению с базовой жидкостью [8]; неоднозначное (при различных параметрах) влияние наночастиц на теплоотдачу в однофазном потоке и при пузырьковом кипении [9, 10]; возможность получения более высокой критической плотности теплового потока при кипении [11]. Кроме того, на процесс кипения может существенно повлиять изменение структуры и шероховатости теплопередающей поверхности, происходящее вследствие оседания на ней наночастиц [12].

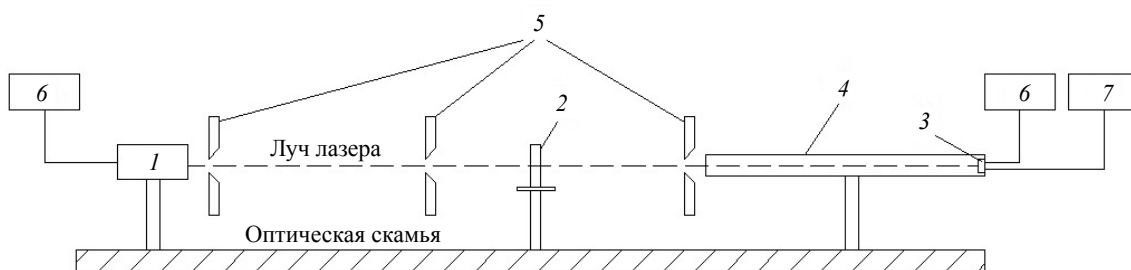


Рис. 1 Схема экспериментальной установки для определения стабильности нанофлюидов

Целью настоящей работы являлось исследование влияния наночастиц Al_2O_3 на процесс кипения чистого изопропанола, а также изучение влияния наночастиц TiO_2 и сурфактанта (олеиновой кислоты) на процесс кипения растворов R11/масло.

Приготовление нанофлюидов и их стабильность

В данной работе были исследованы два типа наночастиц. Нанофлюид изопропанол/ Al_2O_3 приготавливался путем смешивания чистого изопропанола с с фабричным образцом нанофлюида (CAS 70-21-29), содержащим 80 масс. % изопропилового спирта и 20 масс. % наночастиц Al_2O_3 . Размер наночастиц Al_2O_3 в образце составлял не более 50 нм.

Наночастицы $TiO_2 < 25$ нм (CAS 1317-70-0) были выбраны для исследования их влияния на процесс кипения раствора R11/минеральное компрессорное масло. При приготовлении образцов наномасла (TiO_2 /минеральное масло), в качестве стабилизатора (сурфактанта) использовалась олеиновая кислота (ОК).

Технология получения образцов наномасел включала несколько процедур. Необходимое количество наночастиц добавлялось в раствор н-гексана с ОК. Полученный образец подвергался механическому диспергированию в течение 24 часов в шаровой мельнице, которая была заполнена шариками диаметром 2 мм из ZnO_2 . После механического диспергирования промежуточный образец нанофлюида (н-гексан/ОК/наночастицы TiO_2) в определенной пропорции смешивался с минеральным компрессорным маслом. Для обеспечения стабильности приготовленного образца наномасла его подвергали ультразвуковой гомогенизации в течение 30 минут. Примеси н-гексана в образце наномасла удалялись вакуумированием.

В рамках рассмотренных технологий были получены следующие нанофлюиды: изопропанол/ Al_2O_3 с концентрациями наночастиц (0,05 и 0,1 масс. %) и минеральное наномасло — компрессорное масло/ОК/ TiO_2 с концентрацией олеиновой кислоты 3,93 масс. % и наночастиц 2,02 масс. %. После добавления полученного образца наномасла в хладагент R11 концентрации компонентов составили: масло 3,6 масс. %; олеиновая кислота 0,15 масс. % и наночастицы TiO_2 0,08 масс. %.

Полученные нанофлюиды подвергались исследованию на устойчивость с помощью установки работающей по принципу турбидиметра (рис. 1). В качестве источника света был использован лазер 1 (длина волны 650 нм). Луч лазера, проходя через оптическую ячейку 2, содержащую исследуемый нанофлюид, попадает на фотодиод 3. Фотодиод 3 был помещен в трубку 4, покрытую изнутри материалом с высоким коэффициентом поглощения

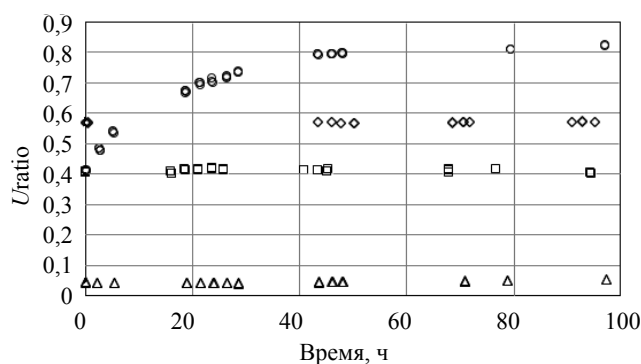


Рис. 2. Устойчивость полученных нанофлюидов:

◇ — изопропанол/ Al_2O_3 (0,5 масс. %); Δ — масло/ОК/ TiO_2 ;
○ — масло/ОК/ TiO_2 /R11;
□ — масло/ОК/ TiO_2 /R11 (перемешивался)

для исключения попадания на фотодиод рассеянного света. Для получения параллельного пучка света диаметром 2 мм были использованы оптические щели 5. Для питания лазера и фотодиода служат стабилизированные источники питания 6. Показания фотодиода в вольтах регистрировались мультиметром 7 (RIGOL DM3064).

Эксперименты по определению устойчивости нанофлюидов проводились следующим образом: вначале измерялся максимальный сигнал, получаемый от фотодиода — U_{max} (В), без установки образца 2. После чего устанавливался образец 2 и измерялся сигнал — U_{nano} (В). величиной, характеризующей устойчивость нанофлюида, является отношение $U_{ratio} = U_{nano} / U_{max}$. Результаты проведенных исследований стабильности нанофлюидов показаны на рис. 2.

Из данных рис. 2 следует, что нанофлюиды изопропанол/ Al_2O_3 и масло/ОК/ TiO_2 остаются устойчивыми во всем интервале времени проведения исследований. Добавление хладагента R11 в нанофлюид масло/ОК/ TiO_2 приводит к нарушению стабильности. На рисунке так же представлена информация для нанофлюида R11/масло/ОК/ TiO_2 , который перед измерением U_{ratio} механически перемешивался. Этот процесс имитирует условия перемешивания кипящего раствора в ячейке во время кипения. При перемешивании нанофлюида R11/масло/ОК/ TiO_2 величина U_{ratio} остается постоянной, что свидетельствует о неизменности концентрации и размера частиц в процессе кипения.

Влияние наночастиц Al_2O_3 на интенсивность кипения и отрывной диаметр пузырьков при кипении изопропанола

Исследования проводились на установке, которая реализует метод циркуляции вещества в замкнутом контуре.

Объем бойлера равен 1 л. В качестве рабочего участка (поверхности нагрева) использовался тонкостенный (толщина стенки 0,1 мм) капилляр из нержавеющей стали диаметром 2 мм и длиной 730 мм. Для визуализации процесса кипения экспериментальная установка снабжена двумя, плоскопараллельными окнами. Установка снабжена системой отбора проб для контроля концентрации исследуемых растворов. Детально описание экспериментальной установки, методика проведения экспериментов, а так же результаты тестовых экспериментов представлены в работе [13].

Исследования проводились при постоянных температурах кипения 60 и 75 °С для чистого изопропанола и нанофлюидов с массовой концентрацией наночастиц Al_2O_3 0,05 и 0,1 масс. %. Полученные экспериментальные данные о влиянии наночастиц на коэффициент теплоотдачи показаны на рис. 3.

Анализ поведения 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.

По мнению авторов, научно обоснованное объяснение обнаруженных эффектов возможно только с использованием информации о теплофизических свойствах на-

нофлюидов и дополнительных исследований процессов кипения, направленных на разъяснение влияния наночастиц на образование паровых пузырьков с учетом шероховатости поверхности, плотности центров парообразования, отрывного диаметра пузырьков и других факторов.

В процессе исследований были так же получены фотографические изображения процессов кипения чистого изопропанола, а так же нанофлюидов (изопропанол/ Al_2O_3), которые в дальнейшем использовались для получения информации об отрывном диаметре пузырьков. Примеры полученных изображений представлены на рис. 4.

Полученные изображения использовались для получения информации об отрывном диаметре пузырьков. Методика определения диаметра отрывных пузырьков описана в работе [13]. Результаты этой обработки приведены на рис. 5, где представлены значения медиан распределений диаметров пузырьков.

Из представленных на рис. 5 результатов видно, что отрывные диаметры пузырьков в нанофлюидах и в базовой жидкости могут существенно отличаться. Их величина определяется как температурой и плотностью теплового потока, так и концентрацией наночастиц в изопропаноле. При этом зависимость отрывного диаметра от того или иного параметра не всегда однозначна. В частности, при температуре кипения 60 °С величина D_0 в нанофлюидах всегда меньше, чем в чистом изопропаноле. При температуре кипения 75 °С в области низких тепловых потоков

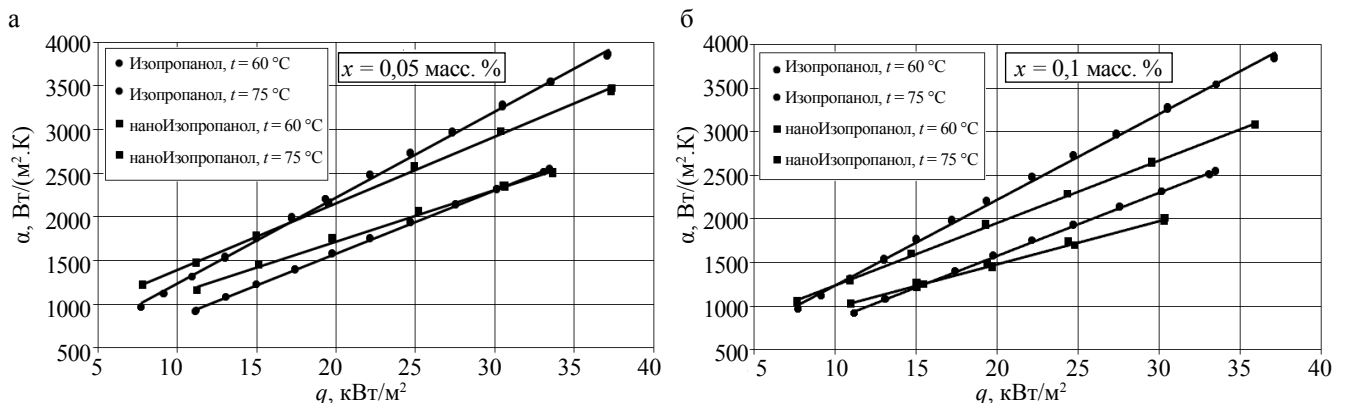


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от плотности теплового потока q

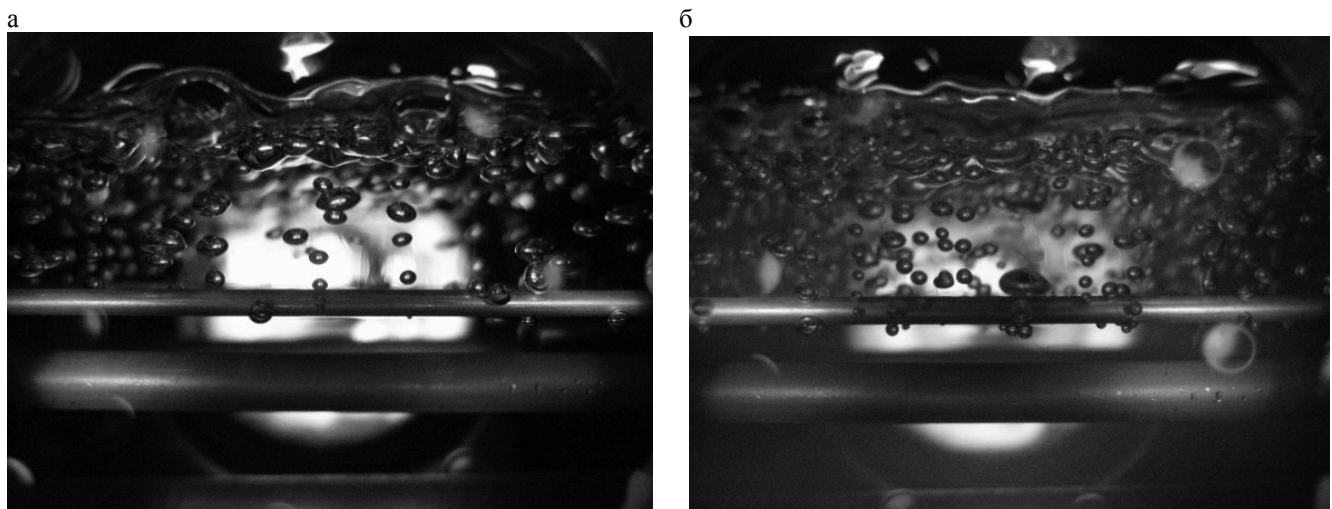


Рис. 4. Фотографические изображения процессов кипения при температуре 60 °С и плотности теплового потока 16,4 кВт/м²: а — изопропанол; б — изопропанол/ Al_2O_3 ($x = 0,05$ масс. %)

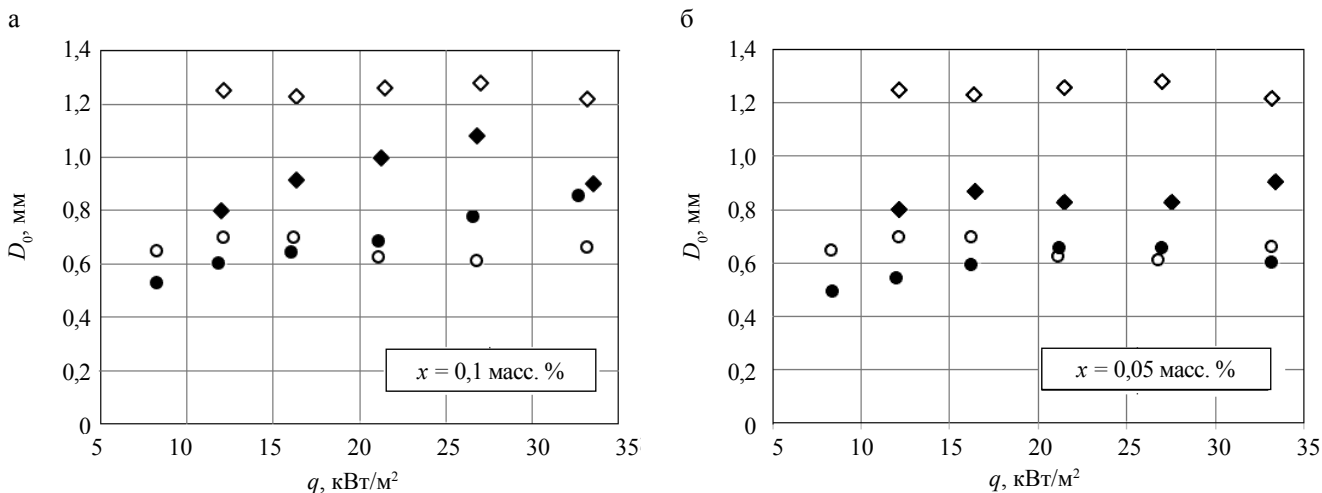


Рис. 5. Отрывной диаметр пузырьков при кипении изопропанола и нанофлюидов изопропанол/ Al_2O_3 : \diamond — изопропанол, $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$; \circ — изопропанол, $t = 75\text{ }^\circ\text{C}$; \blacklozenge — изопропанол/ Al_2O_3 , $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$; \bullet — изопропанол/ Al_2O_3 , $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$

отрывные диаметры пузырьков для нанофлюида меньше, чем для базовой жидкости. Однако по мере увеличения теплового потока в нанофлюиде отрывные диаметры возрастают и становятся большими, чем в чистом изопропаноле.

Исследование влияния сурфактанта и наночастиц на интенсивность кипения растворов хладагент/масло

Одним из определяющих шумовых эффектов при экспериментальном исследовании процессов кипения РХМ является изменение состава раствора в зоне кипения по сравнению с его брутто-составом (т.е. средним составом всего раствора, находящегося в измерительной ячейке) и формирование градиента концентрации по высоте измерительной ячейки [4, 5]. Для исследования этого эффекта проводился анализ состава отобранных в опытах образцов раствора. Концентрация отобранных образцов определялась весовым методом — по результатам взвешивания на аналитических весах GR-300 (погрешность единичного взвешивания — 0,5 мг) пустого шприца, шприца с раствором и шприца после удаления из образца РХМ хладагента. Выпаривание хладагента из образца производилось при температуре 80 °С до момента, когда прекращалось изменение массы шприца. Следует указать, что результаты проведенных контрольных опытов подтвердили надежность такой методики.

Проведенный анализ показал, что погрешность определения концентрации в проведенных исследованиях не превышала $2 \cdot 10^{-4}$ кг/кг.

Объектом исследования являлась модельная система — раствор хладагента R11 с минеральным компрессорным маслом ISO 10. В результате проведенных экспериментов была получена информация о коэффициенте теплоотдачи чистого хладагента R11 и его растворов с минеральным маслом при температуре кипения 40 °С. Брутто-концентрации масла в исследованных растворах составляли 3,6; 7,8 и 14,4 масс. %. Результаты определения состава кипящего раствора при различных плотностях теплового потока показаны на рис. 6.

Как следует из данных рис. 6, концентрации масла в кипящем слое и в области, отстоящей на (5...10)

мм ниже него, практически совпадают. В то же время состав кипящего раствора существенно изменяется в зависимости от тепловой нагрузки и, соответственно, от режима кипения, а также может значительно отличаться от брутто-состава.

Ввиду последнего обстоятельства представляется некорректным относить измеряемые характеристики процесса кипения к брутто-концентрации РХМ. В связи с этим обобщение полученных экспериментальных данных, например, построение кривых кипения и зависимостей коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для растворов постоянной концентрации (для изоконцентраций), следует производить путем построения поверхностей в координатах $q - \Delta T - x_{oil}$ и $\alpha - q - x_{oil}$, описывающих экспериментальные точки, относящиеся к постоянной температуре кипения, но к различным составам раствора, с последующим расчетом величин при $x_{oil} = const$. В результате обработки экспериментальных данных было получено аппроксимационное уравнение, с помощью которого была построена поверхность $\alpha - q - x_{oil}$ показанная на рис. 7.

По результатам данной обработки экспериментальной информации были получены, представленные на рис. 8, зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, соответствующие постоянным концентрациям кипящего раствора 3,6; 7,8 и 14,4 масс. %. На этом же рисунке приведены экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи, отнесенные к брутто-концентрациям исследованных в опытах растворов.

Анализ информации, приведенной на рис. 8, свидетельствует о значительном отклонении значений коэффициента теплоотдачи, отнесенных к брутто-концентрациям, от величин, рассчитанных в соответствующих сечениях поверхности $\alpha - q - x_{oil}$. Так, в области низких плотностей теплового потока при концентрации $x_{oil} = 7,8\%$ максимальное отклонение составляет 6,5%, а при концентрации $x_{oil} = 14,4\%$ — 22%. С повышением плотности теплового потока эти отклонения уменьшаются до 2–3% (рис. 9).

При исследовании процессов кипения нанофлюидов также нужно корректно учитывать влияние сурфактантов, которые используются для стабилизации гетерогенных коллоидных систем. С этой целью, на первом этапе, был

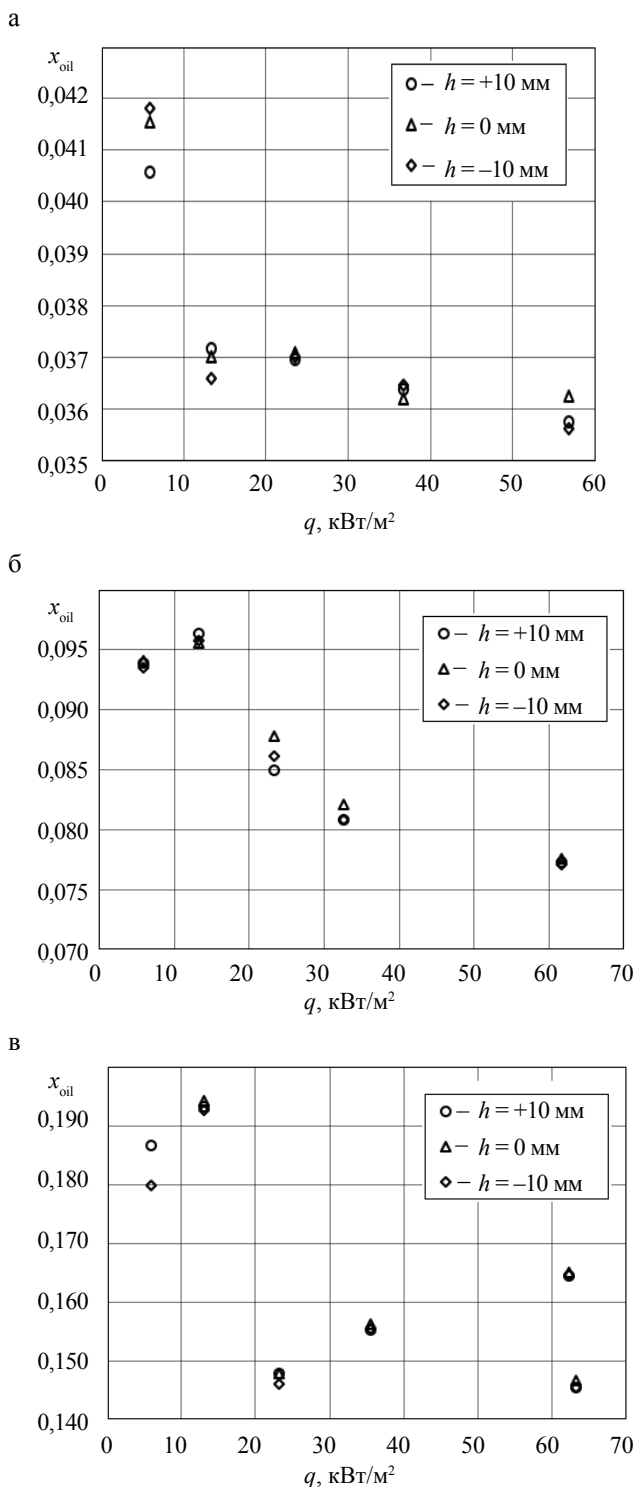


Рис. 6. Состав кипящего раствора R11/масло при различных плотностях теплового потока: а — брутто-концентрация $x_{oil} = 3,6\%$; б — брутто-концентрация $x_{oil} = 7,8\%$; в — брутто-концентрация $x_{oil} = 14,4\%$ (h — положение пробоотборника относительно плоскости в которой находится нагреватель)

проведен эксперимент по влиянию олеиновой кислоты (ОК) на процесс кипения раствора R11/масло. Для этого был исследован процесс кипения раствора, который состоял из хладагента R11 95,9 масс. %, компрессорного масла — 3,9 масс. % и олеиновой кислоты 0,2 масс. %. Во время эксперимента концентрация масла в кипящем растворе не остается постоянной. Поэтому сравнение полученных значений коэффициента теплоотдачи при кипении раствора масло/ОК/R11 должно производиться с рас-

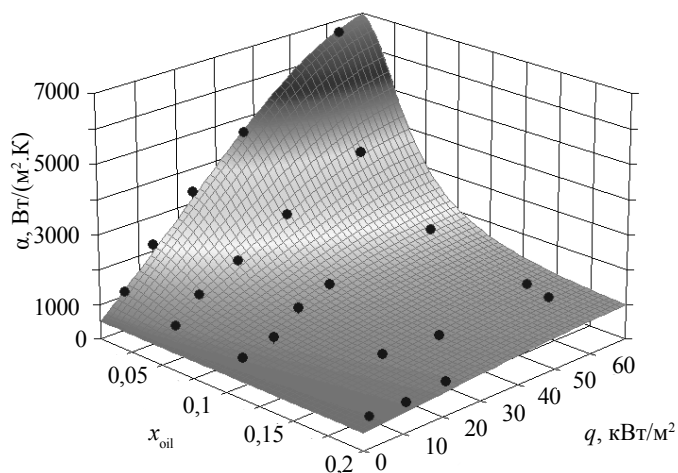


Рис. 7. Обобщение экспериментальных данных о коэффициенте теплоотдачи при кипении растворов R11/масло (температура кипения 40°C)

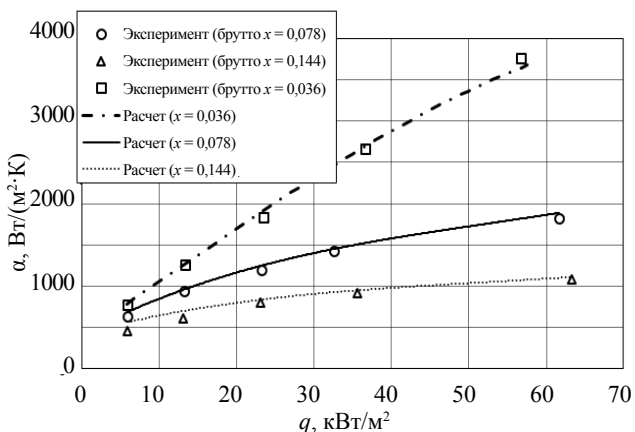


Рис. 8. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при кипении растворов R11/масло (температура кипения 40°C)

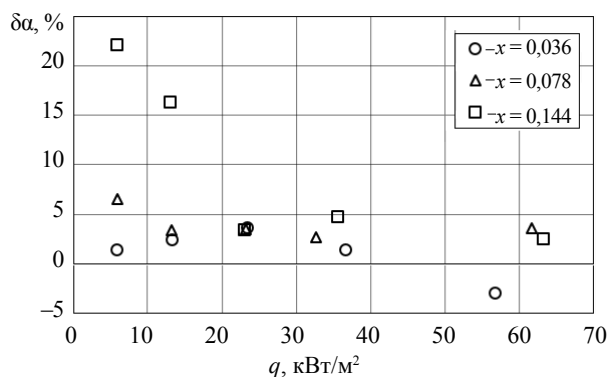


Рис. 9. Отклонения значений коэффициента теплоотдачи, отнесенных к брутто-концентрациям, от величин, рассчитанных в соответствующих сечениях поверхности $\alpha - q - x_{oil}$

четными данными в соответствующих сечениях поверхности $\alpha - q - x_{oil}$ (при измеренных концентрациях масла). Результаты этого сравнения приведены в табл. 1.

На втором этапе, таким же методом определялось влияние наночастиц TiO_2 на интенсивность процессов кипения растворов масло/ОК/R11 по сравнению с интенсивностью кипения раствора масло/R11 (табл. 2).

Выполненный анализ полученных результатов показывает, что примеси ОК в растворах масло/R11 способствует

Таблица 1

Сравнение коэффициентов теплоотдачи при кипении раствора R11/масло с примесями ОК и без примесей ОК

x_{oil}	q , кВт/м ²	α , Вт/(м ² ·К) (R11/масло)	α , Вт/(м ² ·К) (R11/масло/ОК)	$\delta\alpha$, %
3,94	61,785	3557	3876	9,0
3,97	36,402	2517	2582	2,6
4,08	23,731	1792	1846	3,0
4,10	13,499	1235	1276	3,3
4,55	5,967	744	745	0,1

Таблица 2

Сравнение коэффициентов теплоотдачи при кипении раствора R11/масло с примесями ОК/TiO₂ и без примесей ОК/TiO₂

x_{oil}	q , кВт/м ²	α , Вт/(м ² ·К) (R11/масло)	α , Вт/(м ² ·К) (R11/масло/ОК/TiO ₂)	$\delta\alpha$, %
3,76	61,519	3695	3787	2,5
3,86	36,839	2589	2468	- 4,7
3,99	23,724	1814	1736	- 4,3
4,02	13,476	1243	1178	- 5,2
4,22	5,904	750	693	- 7,6

увеличению коэффициента теплоотдачи примерно до 9% при высоких плотностях тепловых потоков. При низких тепловых потоках влияние сурфактанта на коэффициент теплоотдачи не обнаружено.

Добавление наночастиц TiO₂ в смесь масло/ОК/R11 не приводит к существенному изменению коэффициента теплоотдачи при высоких плотностях тепловых потоков. При низких плотностях тепловых потоков наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи на 7,6%.

Выводы

В статье приведены результаты комплексного исследования особенностей экспериментального изучения процессов кипения в свободном объеме нанофлюидов, в состав которых входят не только наночастицы, но и сурфактанты. Показано, что на интенсивность процессов кипения в нанофлюидах оказывают влияние различные факторы, такие как концентрация наночастиц и сурфактантов, плотность теплового потока, температура кипения и устойчивость объектов исследования. Вклад каждого из указанных факторов зависит от параметров, при которых проводится исследование процессов кипения. Поэтому выводы и оценки перспективности применения нанофлюидов в холодильной технике не могут носить общий характер, а должны быть конкретизированы к условиям ее эксплуатации.

Список литературы (References)

- Shen B., Groll E. A. A Critical Review of the Influence of Lubricants on the Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerants. Part I: Lubricant Influence on Pool and Flow Boiling. *Int. Journal of HVAC&R Research*. 2005. Vol. 11. No 3. P. 341–355.
- Shen B., Groll E. A. A Critical Review of the Influence of Lubricants on the Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerants. Part II: Lubricant Influence on Condensation and Pressure Drop. *Int. Journal of HVAC&R Research*. 2005. Vol. 11. No 4. P. 511–526.
- Kedzierski M. A. The Effect of Lubricant Concentration, Miscibility, and Viscosity on R134a Pool Boiling. *Int. J. of Refrig.* 2001. Vol. 24. No 4. P. 348–366.

- Kedzierski M. A. Effect of Bulk Lubricant Concentration on the Excess Surface Density During R123 Pool Boiling. *Int. J. of Refrig.* 2002. Vol. 25. No 8. P. 1062–1071.
- Kedzierski M. A. Use of Fluorescence to Measure the Lubricant Excess Surface Density During Pool Boiling. *Int. J. of Refrig.* 2002. Vol. 25. No 8. P. 1110–1122.
- Thome J. R., Phil D. Comprehensive Thermodynamic Approach to Modeling Refrigerant-Lubricating Oil Mixtures. *Int. Journal of HVAC&R Research*. 1995. Vol. 1. No 2. P. 110–125.
- Naphon P., Assadamongkol P., Bororak T. Experimental Investigation of Titanium Nanofluids on the Heat Pipe Thermal Efficiency. *Int. Commun. Heat Mass. Transfer*. 2008. Vol. 35. P. 1316–1319.
- Nikitin D., Zhelezny V., Grusko V., Ivchenko D. Surface Tension, Viscosity, and Thermal Conductivity of Nanolubricants and Vapor Pressure of Refrigerant/Nanolubricant Mixtures. *Estern-European Journal of enterprise technogies*. 2012. Vol. 5/5. N 59. P. 12–17.
- Xuan Y., Li Q. Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. *J. Heat Transfer*. 2003. Vol. 125. P. 151–155.
- Trisaksri V. Wongwises S. Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂-R141b nanofluids. *Int. J. Heat Mass. Transfer*. 2009. Vol. 52. P. 1582–1588.
- Kim H., Kim J., Kim M. Experimental Study on CHF Characteristics of Water-TiO₂ Nano-Fluids. *Nuclear Engineering and Technology*. 2006. Vol. 38. No 1. P. 61–68.
- Kim S. J., Bang I. C., Hu L. W. Effects of Nanoparticle Deposition on Surface Wettability Influencing Boiling Heat Transfer in Nanofluids. *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 89. No 15.
- Нукулин А. Г., Семенюк Ю. В., Лукьянов Н. Н. Экспериментальная установка для исследования процессов кипения чистых жидкостей и растворов в свободном объеме // Холодильная техника и технология. 2013. №4 (144). С. 12–18. [Nikulin A. G., Semenyuk Yu. V., Luk'yanov N. N. The experimental installation for research of processes of boiling of pure liquids and solutions in the free volume. *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya*. 2013. N 4 (144). P. 12–18. (in Russian).]