

УДК 536.24

*А.Г. Никулин, Ю.В. Семенюк, Н.Н. Лукьянов*

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ ЧИСТЫХ ЖИДКОСТЕЙ И РАСТВОРОВ В СВОБОДНОМ ОБЪЕМЕ**

*В статье приведено описание экспериментальной установки для исследования характеристик кипения в свободном объеме чистых жидкостей, растворов хладагент/масло и нанофлюидов. Изложена методика проведения экспериментов, приводятся результаты тестовых экспериментов по изучению процессов кипения изопропанола и хладагента R11. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами расчетов в рамках существующих моделей.*

**Ключевые слова:** Кипение в свободном объеме – Коэффициент теплоотдачи – Отрывной диаметр пузырька.

*А.Г. Нікулін, Ю.В. Семенюк, Н.Н. Лук'янов*

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КИПІННЯ ЧИСТИХ РІДИН ТА РОЗЧИНІВ У ВІЛЬНОМУ ОБ'ЄМІ**

*У статті наведено опис експериментальної установки для дослідження характеристик кипіння у вільному об'ємі чистих рідин, розчинів холодоагент/мастило і нанофлюїдів. Викладено методику проведення експериментів, наводяться результати тестових експериментів з вивчення процесів кипіння ізопропанолу і холодоагенту R11. Проведено порівняння отриманих експериментальних даних з результатами розрахунків у рамках існуючих моделей.*

**Ключові слова:** Кипіння у вільному об'ємі – Коефіцієнт тепловіддачі – Відривний діаметр бульбашки.

*A.G. Nikulin, Yu.V. Semenyuk, N.N. Lukianov*

Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatnaja str., Odessa, 65039

**THE EXPERIMENTAL UNIT FOR INVESTIGATION OF PURE LIQUIDS AND SOLUTIONS POOL BOILING PROCESS**

*This paper presents the experimental setup for investigating of the pool boiling characteristics for the pure liquids, refrigerant/oil solutions and nanofluids. The experimental methodology, the results of test experiments for the pool boiling of the isopropanol and refrigerant R11 are reported. A comparison between experimental data obtained and data calculated by existing models has been performed.*

**Keywords:** Pool boiling – Heat transfer coefficient – Departure diameter of bubble.

**I. ВВЕДЕНИЕ**

Кипение является наиболее эффективным процессом передачи теплоты в терморегулирующем оборудовании. В частности, интенсивность кипения рабочих тел определяет эффективность теплообменных аппаратов холодильных машин, тепловых насосов и тепловых труб.

Применительно к пароконденсаторным 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, и, в целом, повышения его энергетической эффективности [7]. Следует выде-

лить несколько недостаточно изученных на сегодня особенностей передачи теплоты в нанофлюидах: бóльшая 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]; более высокая критическая плотность 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].

Целью настоящей работы являлось создание и апробация экспериментальной установки для исследования процессов кипения в свободном объеме чистых жидкостей, растворов хладагент/масло и нанофлюидов.

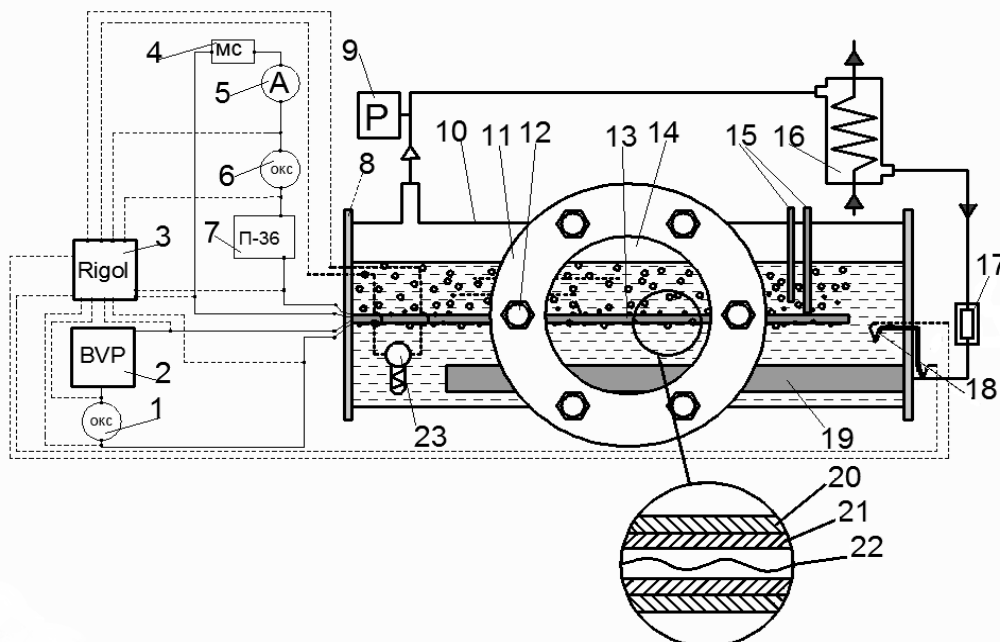
## II. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На кафедре теплофизики и прикладной экологии Одесской национальной академии пищевых технологий создана экспериментальная установка, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1. Установка реализует метод свободной циркуляции вещества по замкнутому контуру. Кипение жидкости происходит в цилиндрической (диаметр – 70 мм, объем – 1 дм<sup>3</sup>) измерительной ячейке (бойлере) 10, снабженной боковыми пло-

скопараллельными кварцевыми окнами 14, через которые может производиться кино- и фотосъемка кипящей жидкости. Окна уплотнены фланцами 11 при помощи болтов 12. Диаметр смотрового сечения окон составляет 54 мм. Поверхность бойлера теплоизолирована слоем пенополиуретана с эффективной теплопроводностью 0,02 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При кипении вещества в бойлере пар через лабиринтный сепаратор поступает в конденсатор 16, где конденсируется на поверхности труб теплообменника, через который прокачивается хладоноситель из вспомогательного термостата. Далее конденсат проходит через обогреваемый участок 17, где принимает температуру, близкую к температуре кипящей в бойлере жидкости. Разность температур конденсата на входе в бойлер и кипящей жидкости контролируется с помощью дифференциальной термопары 18. Конденсат в бойлере равномерно распределяется по объему жидкости через коллектор 19.

Наличие определенного количества летучего компонента раствора в конденсаторе и соединительных магистралях приводит к изменению состава исследуемого образца по сравнению с брутто-составом. Составы раствора в кипящем слое и в основном его объеме могут существенно отличаться [4,5]. Конструкция установки позволяет производить отборы небольших порций жидкости из различных слоев кипящего раствора через капилляры 15 для последующего анализа их состава.



**Рисунок 1** – Принципиальная схема экспериментальной установки

1, 6 - образцовая катушка сопротивления; 2 - источник питания BVP 30V/50A; 3 - мультиметр Rigol 3064; 4 - магазин сопротивлений; 5 - амперметр; 7 - стабилизированный источник питания П-36; 8 - фланец бойлера; 9 - пьезоэлектрический преобразователь давления WKA A-10; 10 - бойлер; 11 - фланец смотрового окна; 12 - болты; 13 - рабочий участок (нагреватель); 14 - смотровое окно; 15 - система отбора проб жидкости из бойлера; 16 - конденсатор; 17 - обогреваемый участок; 18 - дифференциальная термопара; 19 - коллектор; 20 - стенка рабочего участка; 21 - фторопластовая изоляция; 22 - платиновая проволока; 23 - медный термометр сопротивления.

Кроме того, благодаря плоскопараллельному расположению окон и их материалу (оптически однородному кварцевому стеклу) обеспечивается возможность определения состава раствора оптическими методами.

Рабочим участком (поверхностью нагрева) является капилляр с толщиной стенки 0,1 мм, диаметром 2 мм, длиной 730 мм и сопротивлением 0,548 Ом при 20 °С. Материал капилляра - нержавеющая сталь. Капилляр изогнут по М-образной форме и крепится на фторопластовой подставке. Подвод электроэнергии от стабилизированного источника питания 2 к рабочему участку осуществляется через два изолированных электропровода, впаянных в съемный фланец 8. Электрическая мощность, подводимая к рабочему участку, определяется компенсационным методом с использованием образцовой катушки сопротивления 1 P322 класса точности 0,01.

Средняя температура поверхности рабочего участка определяется по сопротивлению внутреннего термометра - протянутой через капилляр электроизолированной платиновой проволоки 22 диаметром 0,1 мм, имеющей сопротивление 9,5 Ом. Сопротивление платиновой проволоки определяется по компенсационному методу с использованием образцовой катушки сопротивления 6 P321 класса точности 0,01. Питание измерительной цепи осуществляется с помощью стабилизированного источника питания 7. Сила тока, проходящего через термометр, не превышает 2,5 мА.

Температура кипящей жидкости измеряется медным термометром сопротивления 19 с погрешностью 0,05 К.

Давление в ячейке измеряется с помощью пьезоэлектрического преобразователя давления 9 WKA A-10 с погрешностью не выше 0,25 %.

Все измерения осуществляются цифровым мультиметром 3 Rigol 3064.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки работоспособности установки и воспроизводимости получаемых результатов были проведены эксперименты с изопропанолом и хладагентом R11. Выбор объектов исследования обусловлен тем, что эти вещества предполагается в дальнейшем использовать как базовые в модельных системах при изучении процессов кипения нанофлюидов и растворов хладагент/масло. Здесь важными являются те обстоятельства, что изопропанол образует устойчивые растворы с наночастицами  $Al_2O_3$  в широком интервале концентраций, а параметры процессов кипения R11 позволяют решать поставленные в исследовании задачи без усложнения конструкции установки.

Перед проведением эксперимента исследуемые образцы подвергались тщательной очистке от растворенных в них газов. Количество заправляемого в измерительную ячейку вещества подбиралось таким образом, чтобы уровень кипящей жид-

кости находился на расстоянии (15...20) мм от поверхности нагревателя.

Опыты проводились при постоянных температурах кипения и при различных тепловых потоках. Температура кипящей жидкости поддерживалась постоянной путем регулирования расхода и температуры хладоносителя, поступающего из вспомогательного термостата. В зависимости от тепловой нагрузки на рабочем участке, температуры в бойлере и конденсаторе отличались на (10...25) К.

Получаемые в подобных экспериментах результаты зависят от направления изменения (увеличения или уменьшения) теплового потока. Как было показано в работе [13], при постепенном увеличении теплового потока на начальном (довольно длительном) этапе эксперимента для процесса пузырькового кипения характерна неустойчивость, что приводит к гистерезису кривых кипения, полученных при увеличении и уменьшении теплового потока. Поэтому на каждой изотерме опыт начинался с максимальной тепловой нагрузки на рабочем участке, которая затем снижалась с определенным шагом.

При фиксированном тепловом потоке стационарный режим кипения считался достигнутым после того, как в течение 20 минут наблюдалась неизменность температур жидкости, рабочего участка и давления насыщенных паров.

Тепловой поток, подводимый к рабочему участку, определялся по формуле

$$Q = (U_{PY} \cdot U_{OKC}) / R_{OKC}, \quad (1)$$

где  $U_{PY}$  и  $U_{OKC}$  – падение напряжения на рабочем участке и образцовой катушке сопротивления 1, соответственно;  $R_{OKC}$  – сопротивление образцовой катушки 1.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по формуле

$$\alpha = Q / (F \cdot \Delta t), \quad (2)$$

где  $F$  - площадь рабочего участка, которая определялась по результатам измерения размеров капилляра с погрешностью 0,2 %;  $\Delta t$  – температурный напор (разность температур рабочего участка и кипящей жидкости).

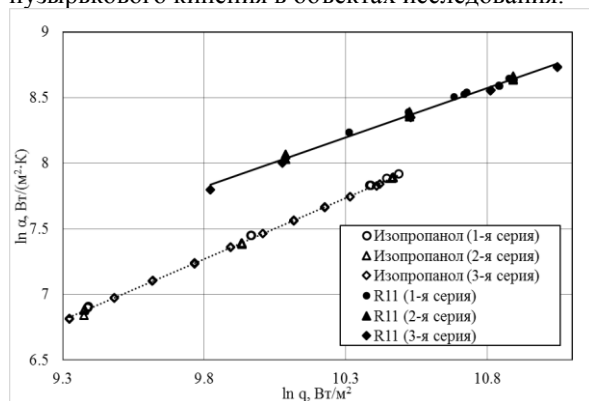
Температурный напор определялся как разность показаний внутреннего термометра рабочего участка и медного термометра сопротивления с использованием данных, полученных при их совместной градуировке, которая производилась по образцовому термометру сопротивления ПТС-10 с погрешностью измерения температуры не выше 0,02 К.

В проведенных экспериментах были исследованы кривые кипения изопропанола при температурах 60 и 75 °С в диапазоне плотности теплового потока  $q = (7,5...35)$  кВт/м<sup>2</sup> и кривые кипения R11 при температурах 30, 40, 50 и 60 °С в диапазоне  $q = (1,5...63)$  кВт/м<sup>2</sup>.

По оценке авторов, полные погрешности измеренных величин не превышают: для температурного напора – 0,2 К; для плотности теплового потока – 1,5 %; для коэффициента теплоотдачи – 5 %.

Кроме того, в течение нескольких дней были проведены три серии тестовых экспериментов, результаты которых представлены на рисунке 2.

Из приведенного рисунка видно, что экспериментальные данные, полученные в трех сериях опытов, для каждого из веществ совпадают в пределах экспериментальной погрешности. При этом зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока в логарифмических координатах могут быть аппроксимированы линейными зависимостями с отклонениями, не превышающими экспериментальную погрешность, что свидетельствует о достижении режима развитого пузырькового кипения в объектах исследования.



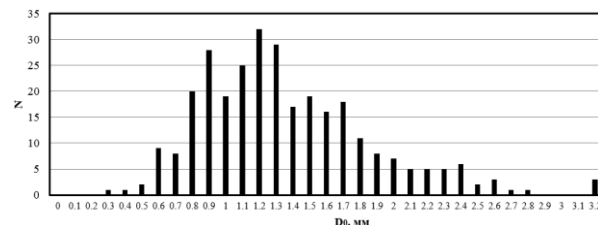
**Рисунок 2** – Результаты тестовых экспериментов по определению коэффициента теплоотдачи.

Следует отметить, что измеренные в опытах значения давления паров отличались от равновесных давлений насыщения не более, чем на 0,17 % для изопропанола и 0,13 % для R11. Сравнение экспериментальных значений давления насыщенных паров производилось с информацией, приведенной в [14] для изопропанола и в [15] для R11.

Как известно, отрывной диаметр пузырька является важным параметром, определяющим интенсивность теплообмена при кипении [16]. Поэтому одна из основных задач исследования заключалась в получении информации о количестве и размерах отрывного диаметра пузырьков. Эти данные были получены при обработке фотографических изображений кипящей жидкости. Обработка фотографий производилась с помощью программного обеспечения AutoCAD. Для этого полученные снимки добавлялись в рабочую зону программы как растровое изображение, на границу фотоизображения пузырька накладывался эллипс, и вычислялась площадь фигуры  $F_3$ , ограниченной этим эллипсом. Диаметр изображения пузырька  $d_0$  принимался равным диаметру круга с площадью  $F_3$ . Масштаб  $M$  определялся как отношение известного диаметра рабочего участка к его диаметру, измеренному на фотографии. Действительный

диаметр пузырька  $D_0$  рассчитывался как произведение  $D_0 = M \cdot d_0$ .

В качестве примера на рисунке 3 приведены результаты обработки фотоизображений пузырьков пара для одного из режимов кипения изопропанола.



**Рисунок 3** – Распределение величины отрывного диаметра пузырьков  $D_0$  по их количеству  $N$  при температуре кипения  $t = 60$  °С и плотности теплового потока  $16,4$  кВт/м<sup>2</sup>

Полученные данные подвергались статистической обработке с целью определения наиболее вероятного отрывного диаметра пузырька, характерного для каждого из режимов кипения. При этом наиболее вероятное значение диаметра  $D_0$  принималось равным медиане распределения.

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в опытах данные о коэффициенте теплоотдачи были сопоставлены со значениями, рассчитанными по нескольким моделям [17-19]. Экспериментальные и расчетные данные представлены на рисунке 4. Результаты их сравнения содержатся в таблице 1, где приведены средние по изотермам (минимальные и максимальные) отклонения экспериментальных значений от расчетных. Наилучшим образом с экспериментальными данными согласуются модели Ribatski-Saiz Jabardo [17] (для изопропанола) и Cooper [17] (для R11).

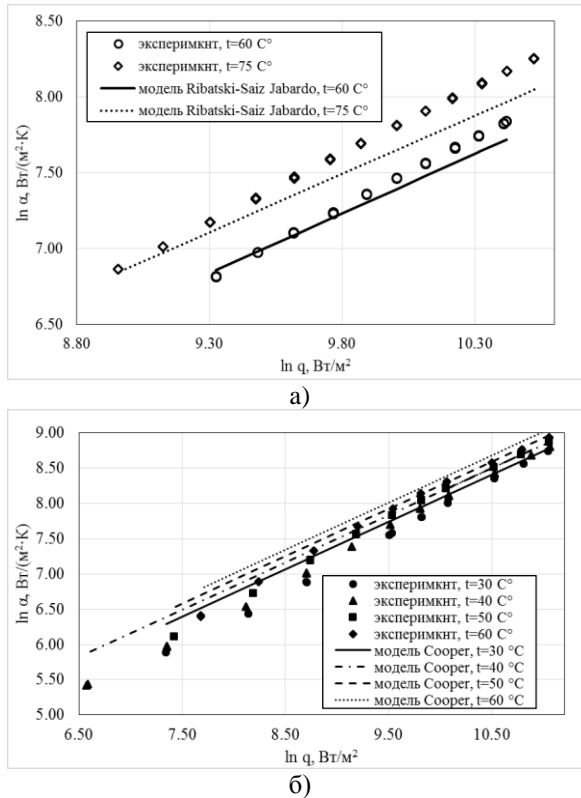
**Таблица 1** – Средние относительные отклонения экспериментальных данных о коэффициенте теплоотдачи от значений, рассчитанных по моделям

Модель	Изопропанол		R11	
	$\delta\alpha$ , % (min)	$\delta\alpha$ , % (max)	$\delta\alpha$ , % (min)	$\delta\alpha$ , % (max)
Mostinski [17]	-25,7	-39,2	-41,4	-45,7
Stephan-Abdelsalam[18]	1,6	-10,0	-37,9	-42,3
Cooper [17]	75,2	106,5	17,6	22,9
Gorenflo [17]	-22,1	-30,7	-20,5	-34,2
Ribatski-Saiz Jabardo [17]	-5,8	-12,9	-32,6	-36,4
Кутателадзе[19]	32,5	65,0	-22,0	-32,7

Полученные экспериментальные данные об отрывном диаметре пузырьков при кипении изопропанола и R11 были сопоставлены со значениями, рассчитанными по формуле, приведенной в работе [20]:

$$\tilde{D}_0 = a\sqrt{1+b \cdot K}, \quad (3)$$

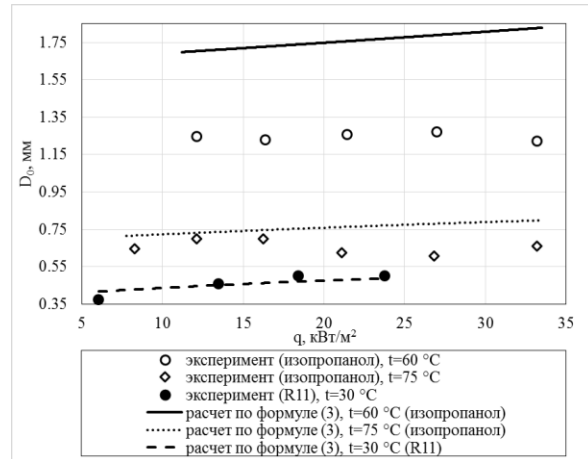
где  $\tilde{D}_0 = D_0 / \sqrt{\sigma / (g \cdot \rho')}$ ;  $K = (Ja / Pr)^2 / Ar_*$ ;  $Ja$  - число Якоба;  $Pr$  - число Прандтля;  $Ar_* = (g / \nu^2) \cdot (\sigma / (g \cdot \rho'))^{3/2}$  - число Архимеда при условии  $\rho' \gg \rho''$ ;  $a$  и  $b$  - коэффициенты,  $a = 0,25$ ,  $b = 10^5$ .



**Рисунок 4** – Экспериментальные и расчетные данные о коэффициенте теплоотдачи: а) изопропанол; б) R11

Анализ представленных на рисунке 5 экспериментальных и расчетных данных показывает, что величина измеренного отрывного диаметра пузырьков при кипении изопропанола остается практически неизменной в исследованном интервале плотности теплового потока.

Диаметр пузырьков при кипении R11 увеличивается с ростом плотности теплового потока, что согласуется с данными, полученными по формуле (3), а также с опытными данными некоторых авторов (см., например, [21]). Известны также результаты, свидетельствующие о возможности обратного эффекта - уменьшения отрывного диаметра пузырьков при увеличении плотности теплового потока в определенном его интервале (см., например, [22]). Однако следует отметить, что в [22] изучалось кипение R11, происходившее на плоской пластине оксида индия-олова (indium tin oxide) при температурном напоре от 19 до 26 К, тогда как в настоящем исследовании температурный напор составлял (4...10) К, а в работе [21], где изучалось кипение FC-72, он был равным 12 К.



**Рисунок 5** – Отрывной диаметр  $D_0$  пузырьков при кипении изопропанола и R11 в зависимости от температуры и плотности теплового потока/

В этой связи уместно отметить, что при очень малых температурных напорах отрывной диаметр пузырьков является функцией преимущественно поверхностного натяжения и выталкивающей силы (см., например, [23]). При увеличении теплового потока (температурного напора) поверхностное натяжение жидкости снижается, что должно приводить к уменьшению отрывного диаметра пузырьков. Дальнейшее повышение температурного напора после определенного его уровня приводит к увеличению и доминированию сил инерции и, соответственно, к увеличению отрывного диаметра пузырьков.

Очевидно, что проявление описанных эффектов зависит как от индивидуальных свойств жидкости, так и от характерных для нее интервалов температурного напора. Дальнейшее изучение этого вопроса, несомненно, представляет научный интерес.

## V. ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные данные о коэффициенте теплоотдачи при кипении удовлетворительно согласуются со значениями, рассчитанными по некоторым моделям. Вместе с тем для описания характеристик процесса кипения изученных веществ на уровне экспериментальной погрешности требуется разработка индивидуальных зависимостей, которые должны учитывать физические особенности объектов исследования и технические характеристики греющей поверхности.

Измеренные величины отрывного диаметра пузырька и качественный характер их зависимости от плотности теплового потока в целом согласуются с выбранной для сравнения моделью [20] и основными физическими представлениями о механизме образования и роста паровых пузырьков в кипящей жидкости.

Таким образом, результаты тестовых экспериментов свидетельствуют, что созданная экспериментальная установка позволяет получать согласованные и воспроизводимые характеристики процессов кипения в свободном объеме в диапазоне плотностей теплового потока от 1,5 до 63 кВт/м<sup>2</sup> и может быть использована для проведения комплексных исследований чистых веществ, нанофлюидов и смесей альтернативных холодильных агентов с маслами, включая измерение давления насыщенных паров динамическим методом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Shen B.** 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 / B. Shen, E. A. Groll // *Int. Journal of HVAC&R Research.* - 2005. - V. 11(3). - P. 341-355.
2. **Shen B.** 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 / B. Shen, E. A. Groll // *Int. Journal of HVAC&R Research.* - 2005. - V. 11(4). - P. 511-526.
3. **Kedzierski M.A.** The effect of lubricant concentration, miscibility, and viscosity on R134a pool boiling / M.A. Kedzierski // *Int. J. of Refrig.* - 2001. - V. 24 N(4). - P.348-366.
4. **Kedzierski M.A.** Effect of bulk lubricant concentration on the excess surface density during R123 pool boiling / M.A. Kedzierski // *Int. J. of Refrig.* - 2002. - V. 25(8). - P. 1062-1071.
5. **Kedzierski M.A.** Use of fluorescence to measure the lubricant excess surface density during pool boiling / M.A. Kedzierski // *Int. J. of Refrig.* - 2002. - V. 25(8). - P. 1110-1122.
6. **Thome J.R.** Comprehensive Thermodynamic approach to modeling refrigerant-lubricating oil mixtures / J.R. Thome, D. Phil // *Int. Journal of HVAC&R Research.* - 1995. - V. 1(2). - P. 110-125.
7. **Naphon P.** Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency / P. Naphon, P. Assadamongkol, T. Bororak // *Int. Commun. Heat Mass. Transfer.* - 2008. - Vol. 35. - P. 1316-1319.
8. **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 technologies*, 2012. - 5/5 (59). - P.12-17.
9. **Xuan Y.** Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids / Y. Xuan, Q. Li // *J. Heat Transfer.* - 2003. - Vol. 125. - P.151-155.
10. **Trisaksri V.** Nucleate pool boiling heat transfer of TiO<sub>2</sub>-R141b nanofluids / V. Trisaksri, S. Wongwises // *Int. J. Heat Mass. Transfer.* - 2009. - Vol. 52. - P.1582-1588.
11. **Kim H.** Experimental study on CHF characteristics of water-TiO<sub>2</sub> nano-fluids / H. Kim, J. Kim, M. Kim // *Nuclear Engineering and Technology.* - 2006. - Vol. 38. - P.61-68.

12. **Kim S. J.** Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids / S. J. Kim, I. C. Bang, L. W. Hu // *Applied Physics Letters.* - 2006. - Vol. 89, Art. 153107.

13. **Нікулін А.Г.** Експериментальне дослідження тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі холодоагентів та їхніх розчинів з компресорними мастилами / А.Г. Нікулін, І.В. Олійник, А.В. Мельник // *Обладнання та технології харчових виробництв: Тематичний збірник наукових праць.* - Випуск 29, 2012. - С. 142-148.

14. NIST Chemistry WebBook [Электронный ресурс]: NIST Standard Reference Database Number 69 // Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology-2013: <http://webbook.nist.gov/chemistry>.

15. **McLinden M.O.** NIST Standard Reference Database 23, NIST Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerants Mixtures Database (REFPROP), Version 7.1 / M.O. McLinden, S.A. Klein, E.W. Lemmon et al.//Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology. - 2003.

16. **Толубинский, В.И.** Теплообмен при кипении / В. И. Толубинский. - Киев: Наук. думка, 1980. - 316 с.

17. Wolverine Heat Transfer Engineering Data book III by John R. Thome. [Электронный ресурс]: <http://www.wlv.com/products/databook/db3>.

18. **Stephan K.** Heat-transfer correlations for natural convection boiling/K. Stephan, M. Abdelsalam// *Int. J. Heat Mass Transfer.* - 1980. - Vol. 23. - P. 73-87.

19. **Кутателадзе С.С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие / С.С. Кутателадзе. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 367 с.

20. **Кутателадзе С.С., Гогонин И.И.** Скорость роста и отрывной диаметр парового пузыря при кипении насыщенной жидкости в условиях естественной конвекции / С.С. Кутателадзе, И.И. Гогонин // *Теплофизика высоких температур.* - 1979. - т. 17, № 4. - С. 792-797.

21. **Ramaswamy C.** High-speed visualization of boiling from an enhanced structure / C. Ramaswamy, Y. Joshi, W. Nakayama et al. // *Int. J. Heat Mass Transfer.* - 2002. - Vol. 45. - P. 4761-4771.

22. **Yan-Hua D.** Photographic study of bubble dynamics for pool boiling of refrigerant R11 / D. Yan-Hua, Z. Yao-Hua, W. Qiu-Liang // *Heat Mass Transfer.* - 2007. - Vol. 43. - P. 935-947.

23. **Zuber N.** Nucleate boiling-the region of isolated bubbles-similarity with natural convection / N. Zuber // *Int. J. Heat Mass Transfer.* - 1953. - Vol. 6. - P. 53-56.

## REFERENCES

1. **Shen B.** 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 / B. Shen, E. A. Groll // *Int. Journal of HVAC&R Research.* - 2005. - V. 11(3). - P. 341-355.

2. **Shen B.** 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 / B. Shen, E. A. Groll // *Int. Journal of HVAC&R Research*. - 2005. - V. 11(4). - P. 511-526.
3. **Kedzierski M.A.** The effect of lubricant concentration, miscibility, and viscosity on R134a pool boiling / M.A. Kedzierski // *Int. J. of Refrig.* - 2001. - V. 24 N(4). - P.348-366.
4. **Kedzierski M.A.** Effect of bulk lubricant concentration on the excess surface density during R123 pool boiling / M.A. Kedzierski // *Int. J. of Refrig.* - 2002. - V. 25(8). - P. 1062-1071.
5. **Kedzierski M.A.** Use of fluorescence to measure the lubricant excess surface density during pool boiling / M.A. Kedzierski // *Int. J. of Refrig.* - 2002. - V. 25(8). - P. 1110-1122.
6. **Thome J.R.** Comprehensive Thermodynamic approach to modeling refrigerant-lubricating oil mixtures / J.R. Thome, D. Phil // *Int. Journal of HVAC&R Research*. - 1995. - V. 1(2). - P. 110-125.
7. **Naphon P.** Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency / P. Naphon, P. Assadamongkol, T. Bororak // *Int. Commun. Heat Mass. Transfer*. - 2008. - Vol. 35. - P. 1316-1319.
8. **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 technologies*, 2012. - 5/5 (59). - P.12-17.
9. **Xuan Y.** Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids / Y. Xuan, Q. Li // *J. Heat Transfer*. - 2003. - Vol. 125. - P.151-155.
10. **Trisaksri V.** Nucleate pool boiling heat transfer of TiO<sub>2</sub>-R141b nanofluids / V. Trisaksri, S. Wongwises // *Int. J. Heat Mass. Transfer*. - 2009. - Vol. 52. - P.1582-1588.
11. **Kim H.** Experimental study on CHF characteristics of water-TiO<sub>2</sub> nano-fluids / H. Kim, J. Kim, M. Kim // *Nuclear Engineering and Technology*. - 2006. - Vol. 38. - P.61-68.
12. **Kim S. J.** Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids / S. J. Kim, I. C. Bang, L. W. Hu // *Applied Physics Letters*. - 2006. - Vol. 89, Art. 153107.
13. **Nikulin A.G.** Eksperymentalne doslidzhennya teploviddachi pry kypinni u vilnomu obyemi kholodoagentiv ta yikhnikh rozchyniv z kompresornymy mastylamy / A.G. Nikulin, I.V. Oliynik, A.V. Melnik // *Obladnannya ta tekhnologiyi kharchovykh vyrobnytstv: Tematychnyy zbirnyk naukovykh prats.* - Vypusk 29, 2012. - S. 142-148.
14. NIST Chemistry WebBook [Электронный ресурс]: NIST Standard Reference Database Number 69 // Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology-2013: <http://webbook.nist.gov/chemistry>.
15. **McLinden M.O.** NIST Standard Reference Database 23, NIST Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerants Mixtures Database (REFPROP), Version 7.1 / M.O. McLinden, S.A. Klein, E.W. Lemmon et al.//Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology. - 2003.
16. **Tolubinskiy, V.I.** Teploobmen pri kipenii / V.I. Tolubinskiy. - Kiev: Nauk. dumka, 1980. - 316 s.
17. Wolverine Heat Transfer Engineering Data book III by John R. Thome. [Электронный ресурс]: <http://www.wlv.com/products/databook/db3>.
18. **Stephan K.** Heat-transfer correlations for natural convection boiling/K. Stephan, M. Abdelsalam// *Int. J. Heat Mass Transfer*. - 1980. - Vol. 23. - P. 73-87.
19. **Kutateladze S.S.** Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie: Spravochnoe posobie / S.S. Kutateladze. - M.: Ènergoatomizdat, 1990. - 367 s.
20. **Kutateladze S.S., Gogonin I.I.** Skorost' rosta i otryvnoj diametr parovogo puzyrja pri kipenii nasyshennoj zhidkosti v uslovijah estestvennoj konvekcii / S.S. Kutateladze, I.I. Gogonin // *Teplofizika vysokih temperatur*. - 1979. - t. 17, № 4. - S. 792-797.
21. **Ramaswamy C.** High-speed visualization of boiling from an enhanced structure / C. Ramaswamy, Y. Joshi, W. Nakayama et al. // *Int. J. Heat Mass Transfer*. - 2002. - Vol. 45. - P. 4761-4771.
22. **Yan-Hua D.** Photographic study of bubble dynamics for pool boiling of refrigerant R11 / D. Yan-Hua, Z. Yao-Hua, W. Qiu-Liang // *Heat Mass Transfer*. - 2007. - Vol. 43. - P. 935-947.
23. **Zuber N.** Nucleate boiling-the region of isolated bubbles-similarity with natural convection / N. Zuber // *Int. J. Heat Mass Transfer*. - 1953. - Vol. 6. - P. 53-56.

---

Получена в редакції 06.08.2013, прийнята к печати 04.09.2013