Интенсификация теплообмена при кипении хладона R113 с помощью модификации греющей поверхности

В. А. Леньков[1], Н. В. Васильев[1,2], С. Н. Вавилов[1] и И. П. Семенов[1,2]
[1] Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия
[2] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, Москва 105005, Россия

E-mail: nikvikvas@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2025 г.

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении хладона R113 в большом объеме при нестационарном режиме охлаждения сферических медных образцов с гладкой и модифицированной поверхностью. Модификация поверхности осуществлялась с помощью нанесения пористого покрытия из медных микросфер с диаметрами $d = 0.10$–0.16 мм методом спекания. Эксперименты показали, что модификация поверхности приводит к увеличению теплоотдачи в диапазоне температурных напоров, охватывающем все режимы кипения (пленочный, переходный, пузырьковый), и критических плотностей тепловых потоков, деформации кривой кипения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Большое количество работ в области теплообмена при кипении в настоящее время посвящено исследованиям интенсификации процесса с помощью целенаправленного изменения (модификации) греющей поверхности [1–5]. Уже разработаны и продолжают разрабатываться и дорабатываться разнообразные способы модификации поверхности, имеющие свои достоинства и недостатки. Среди широко распространенных методов следует отметить обработку деформирующим резанием, сеточные и пористые покрытия, плазменное напыление, травление, микродуговое оксидирование и др. Среди множества отмеченных методов нанесения покрытий для интенсификации теплоотдачи при кипении достаточно перспективной для применения в холодильном, криогенном и нефтехимическом оборудовании является технология спекания частиц-микросфер. Данная технология позволяет получать пористые покрытия, значительно увеличивающие площадь поверхности теплообмена, которая представляет собой развитую открытую капиллярно-пористую структуру с определенным распределением пор по размерам, обеспечивающим эффективную циркуляцию жидкости и пара. Например, в работах [6–9] было показано увеличение в разы теплоотдачи и критических тепловых потоков с помощью нанесения такого рода покрытий при пузырьковом режиме кипения.

В нестационарных процессах охлаждения сильно нагретых тел в кипящих жидкостях (закалка металлических изделий, охлаждение трубопроводов в криогенных жидкостях и др.), когда длительность этого процесса, в основном, определяется интенсивностью отвода теплоты в режиме пленочного кипения с относительно низким коэффициентом теплоотдачи, особое значение приобретает разработка и исследование методов интенсификации теплообмена на теплоотдающих поверхностях с покрытиями при больших температурных напорах. Как уже говорилось выше, потенциально эффективным способом интенсификации теплообмена при кипении различных хладонов является модификация греющей поверхности с помощью нанесения покрытия методом спекания. В случае пористого покрытия такого типа возрастает вероятность более раннего по времени разрушения паровой пленки и возникновения контакта жидкости с поверхностью нагрева. Кроме того, при пленочном режиме кипения течение пара вдоль поверхности с покрытием с размером частиц, превышающим характерные размеры шероховатости гладких поверхностей, может приводить к турбулизации пленки пара, интенсификации теплоотдачи, а также росту второй критической плотности теплового потока ($q_{\text{кр}2}$) и соответствующего температурного напора ($\Delta T_{\text{кр}2}$).

В настоящей работе проводилось исследование влияния покрытия, нанесенного методом спекания микросфер, на теплоотдачу и критический тепловой поток при кипении хладона R113 в режиме нестационарного охлаждения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование теплообмена при кипении хладона R113 проводилось нестационарным методом путем погружения нагретых до 220–230 °C сферических образцов в жидкость, находящуюся при атмосферном давлении (температура насыщения R113 равна 47.8 °C). Схема экспериментальной установки, на которой проводились опыты, представлена на рисунке 1. Установка представляла собой горизонтально расположенный цилиндрический сосуд (поз. 6 на рисунке 1), снабженный двумя смотровыми окнами для проведения визуальных наблюдений. К верхней части сосуда с помощью фланцевого соединения крепился вертикальный конденсатор типа “труба в трубе” (поз. 5 на рисунке 1), охлаждаемый водопроводной водой, протекающей в наружном кольцевом канале. Над конденсатором устанавливалась камера, обогреваемая снаружи электрическими нихромовыми нагревателями для подогрева образцов до заданной температуры с помощью излучения (поз. 4 на рисунке 1). Для уменьшения степени окисления образцов в камеру подавался инертный газ (аргон). Для поддержания температуры жидкости в сосуде на его внешней поверхности располагался вспомогательный электрический нагреватель (поз. 12 на рисунке 1).

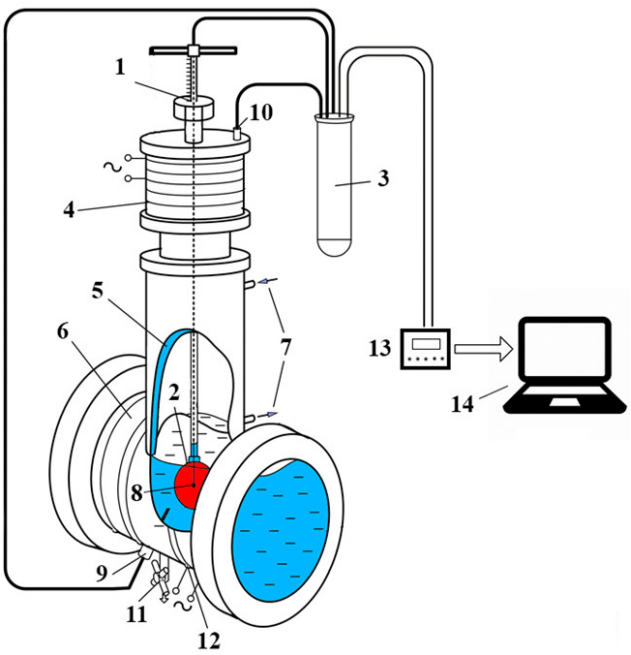

Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: 1 — координатное устройство; 2 — сферический образец; 3 — сосуд Дьюара; 4 — нагреватель образца; 5 — конденсатор; 6 — рабочий участок; 7 — вход, выход охлаждающей воды, 8 — термопара в образце; 9 — термопара в жидкости; 10 — термопара в области нагрева; 11 — сливной клапан; 12 — вспомогательный нагреватель жидкости, 13 — система сбора данных; 14 — персональный компьютер.

После нагрева до требуемой температуры образцы погружались в жидкость. Для измерения температуры образцов при проведении опытов в центр каждой сферы (шара) через отверстие диаметром 0.8 мм заделывались хромель-алюмелевые термопары (поз. 8 на рисунке 1) с диаметром проволоки 0.2 мм. Для измерения температуры жидкости и области нагрева также использовались хромель-алюмелевые термопары (поз. 9 и 10 на рисунке 1 соответственно). Сигналы со всех термопар регистрировались с помощью системы сбора данных (ССД), представляющей собой 24-разрядный аналогово-цифровой преобразователь E24 фирмы L-Card с последующей записью на персональный компьютер. Запись данных на ССД запускалась одновременно с погружением нагретых образцов в жидкость.

Для построения кривых кипения использовалась методика, основанная на регистрации изменения ЭДС термопары от времени и ее преобразовании в зависимость плотности теплового потока с поверхности сферы (q) от разности температур в центре образца и насыщения жидкости (температурного напора $\Delta T_{\text{нас}}$). Мгновенное значение q на поверхности сферы рассчитывалось из уравнения теплового баланса:

$$q = -\frac{C_p(T)m}{F}\frac{dT}{d\tau}, \qquad (1)$$

где C_p — теплоемкость материала образца, m и F — масса и площадь поверхности образца соответственно, $dT/d\tau$ — скорость изменения температуры образца при охлаждении в жидкости. Неопределенность измерения

Рисунок 2. Сферические образцы из меди (d = 22 мм): гладкий (слева) и с покрытием (справа).

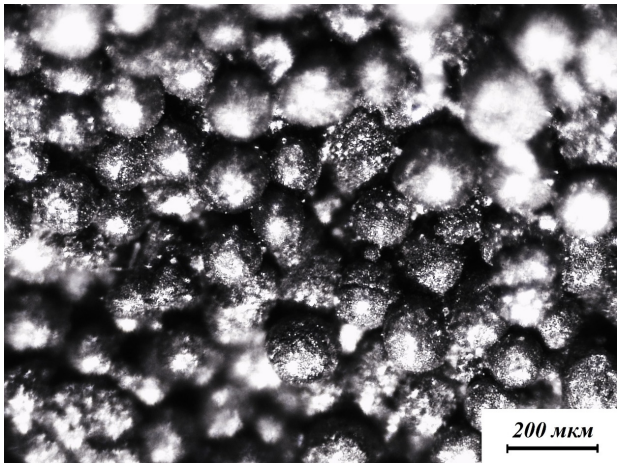

Рисунок 3. Покрытие на образце, полученное методом спекания медных микросфер с d = 0.10–0.16 мм (фото на микроскопе Bresser LCD 50x-2000x).

$\Delta T_{\text{нас}}$ оценивалась в 15%, плотности теплового потока q — в 20%.

В экспериментах использовались сферические образцы из меди двух типов — гладкие без покрытия и с покрытием, полученным методом спекания медных микросфер с диаметрами d = 0.10–0.16 мм. Спекание производилось при температуре $\sim$ 0.8 от температуры плавления меди в восстановительной среде водорода во избежание окисления получаемых образцов. При таких режимах за счет диффузии материала микросфер удается получить достаточно прочное и долговечное покрытие. Толщина покрытия составляла примерно 3–4 слоя спеченных частиц, что позволяло получить пористость в диапазоне нескольких десятков процентов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 4 приведены кривые зависимости плотности теплового потока с поверхности образцов (с покрытием и без) от температурного напора. Прежде всего, следует отметить существенную деформацию кривой кипения при использовании образцов с покрытием, а именно расширение области переходного режима. Также для сферы с покрытием смачивание жидкостью стенки возникает при более высоком значении температурного напора (ΔT) по сравнению с поверхностью без покрытия. На эти эффекты при кипении недогретой

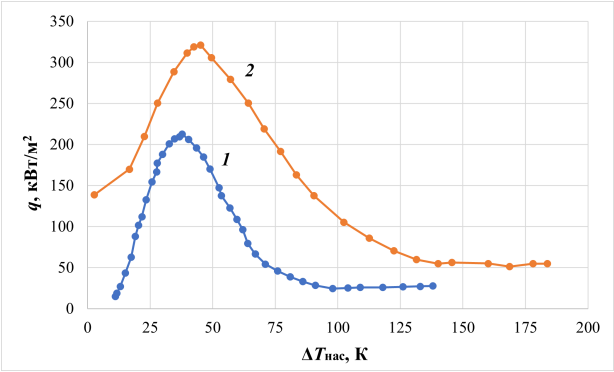

Рисунок 4. Графики изменения плотности теплового потока в зависимости от температуры перегрева центра образца относительно температуры насыщения: 1 — на поверхности гладкой сферы, 2 — на поверхности сферы с покрытием.

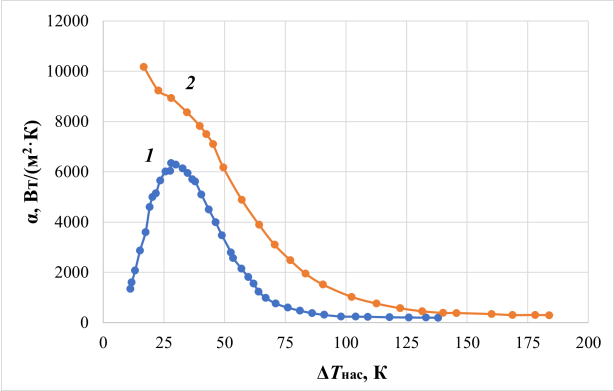

Рисунок 5. Графики изменения коэффициента теплоотдачи в зависимости от температуры перегрева центра образца относительно температуры насыщения: 1 — на поверхности гладкой сферы, 2 — на поверхности сферы с покрытием.

жидкости обращалось внимание в работе [10]. Данные из видеосъемки процесса, представленные в работе [11], показывают, что с уменьшением температуры поверхности при пленочном режиме кипения уменьшается средняя толщина колеблющейся пленки пара. Это способствует монотонному росту теплоотдачи и ускорению потери устойчивости пленки, вследствие чего происходит контакт жидкости со поверхностью, приводящий к возникновению переходного режима кипения с возрастанием коэффициента теплоотдачи (рисунок 5).

По рисунку 5 видно, что во всем диапазоне измерений по температурному напору (при пузырьковом, переходном и пленочном режимах кипения) на образцах с покрытием наблюдались более высокие значения коэффициентов теплоотдачи, достигающие максимального увеличения в 3–4 раза при пленочном режиме. Также, как видно на рисунке 4, нанесение покрытия надежно (примерно в 1.5 раза) увеличивает первую критическую плотность теплового потока.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментально показано увеличение интенсивности отвода теплоты и критической плотности тепловых потоков при кипении в режиме нестационарного охлаждения хладона R113 на сферических образцах с покрытием, нанесенным методом спекания, по сравнению с поверхностью без покрытия в области пленочного, пузырькового и переходного режимов кипения. Что наряду с другими преимуществами данного способа модификации поверхности (высокая степень адгезии с подложкой, прочность, надежность, технологичность) говорит о перспективности его использования для интенсификации процесса кипения в различных областях применения — микроэлектронике, холодильном, криогенном и нефтехимическом оборудовании

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание №075–00269–25–00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liang G and Mudawar I 2019 *Int. J. Heat Mass Transfer* **128** 892–933
2. Wang J and Liang G 2025 *Int. J. Heat Mass Transfer* **239** 126556
3. Володин О А, Печеркин Н И и Павленко А Н 2021 *ТВТ* **59** 280–312
4. Yuan X, Du Y and Su J 2022 *Ren. Sust. Energy Rev.* **156** 111974
5. Sun Y, Tang Y, Zhang S, Yuan W and Tang H 2022 *Ren. Sust. Energy Rev.* **162** 112437
6. Wang X S, Wang Z B and Chen K Z 2010 *Adv. Mater. Res.* **97** 1161–1165
7. Liter S G and Kaviany M 2001 *Int. J. Heat Mass Transfer* **44** 4287–4311
8. Ji X, Xu J, Zhao Z and Yang W 2013 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **48** 198–212
9. Zhang K, Bai L, Lin G, Jin H and Wen D 2019 *App. Therm. Eng.* **149** 377–384
10. Лексин М А 2009 *Исследования пленочного режима теплообмена и кризиса при кипении недогретой жидкости* (Москва: МЭИ)
11. Жуков В М, Казаков Г М, Ковалев С А и Кузма-Кичта Ю А 1974 *Теплообмен и физическая газодинамика* **1** 116–129