

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ И ХЛАДОНОВ В МИКРОКАНАЛЬНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

А.С. Шамирзаев, А.С. Мордовской, В.В. Кузнецов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия*

Исследования процессов тепло- и массопереноса в микросистемах с фазовыми превращениями бурно развиваются в последнее время. Это связано с ростом технологических приложений, которые требуют передачи больших потоков тепла и массы в ограниченном объеме, в том числе в компактных парогенераторах/конденсаторах энергетических и криогенных устройств, системах охлаждения микропроцессоров. При уменьшении масштаба течения возникает широкий спектр явлений, которые не типичны на большом масштабе и слабо изучены. Несмотря на большое количество опубликованных методов расчета теплоотдачи в микроканалах, применение этих методов требует верификации, и задача определения теплоотдачи для различных режимов теплообмена при кипении в микроканалах, как отмечено в [1], остаётся актуальной.

Целью данной работы является экспериментальное исследование локальных характеристик теплообмена при кипении хладонов 141b, 1234yf и воды в микроканальных системах охлаждения. Эксперименты для хладонов проведены в условиях насыщенного кипения в диапазоне массовых паросодержаний от 0 до 0,9 массовых скоростей от 400 до 600 кг/м²с и тепловых потоков от 50 до 500 кВт/м² в теплообменнике длиной 40 мм содержащем 21 микроканал размером 350х930 мкм. Эксперименты для воды проведены в условиях недогретого кипения в диапазоне массовых скоростей от 300 до 5000 кг/м²с и тепловых потоков от 250 до 5000 кВт/м² в теплообменнике длиной 16 мм содержащем 2 микроканала размером 3600х2000 мкм. Проведено сравнение полученных данных с известными корреляциями по теплообмену при кипении в условиях вынужденной конвекции.

Участок для исследования теплоотдачи в условиях насыщенного кипения состоит из: медной микроканальной пластины (МП) размерами 20х40х2,5 мм содержащей 21 микроканал размером 350х930 мкм; корпуса из нержавеющей стали с участками ввода и вывода потока и отборниками давления; медного блока с нагревательными картриджами общей мощностью 600 Вт, который служит для подвода тепла к МП. Предусмотренный парогенератор позволяет регулировать паросодержание потока на входе в участок. По длине МП на расстоянии 5, 15, 25 и 35 мм производится измерение температуры стенки и локального теплового потока. В ходе эксперимента также измеряются: массовый расход; мощность парогенератора; температура на входе в парогенератор; температура и давление во входной и выходной камере экспериментального участка. Экспериментальный участок теплоизолирован. Калибровка теплотерь проводится на сухом участке и верифицируется в ходе тестовых однофазных экспериментов. Калибровка датчиков давления и термопар дополнительно поверяется в условиях адиабатного парожидкостного течения. Методика определения теплоотдачи верифицируется измерением теплоотдачи в условиях однофазной конвекции. Данные однофазных экспериментов с учётом начального участка хорошо согласуются с данными из [2].

В работе получены данные по зависимости теплоотдачи от паросодержания для различных фиксированных тепловых потоков и массовых расходов. Для всех исследованных хладонов построены зависимости теплоотдачи от плотности теплового потока при фиксированном паросодержании соответствующем не расслоенному режиму течения.

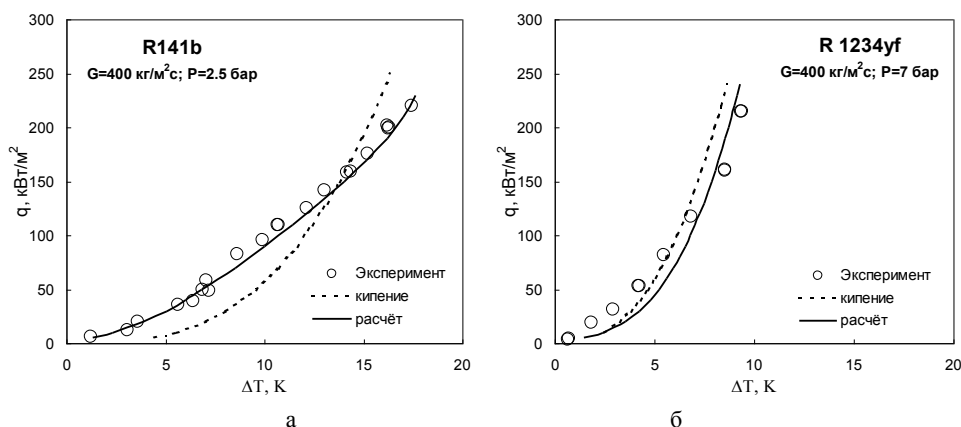


Рис. 1. Зависимость теплового потока от температурного напора в теплообменнике с каналами 350x930 мкм: (а) для R141b; (б) для R1234yf.

Проведено сопоставление экспериментальных данных с расчётом теплоотдачи при кипении в большем объёме и по модели теплоотдачи в условиях вынужденной конвекции по модели из работы [3] основанной на учете фактора подавления пузырькового кипения для тонкой пленки жидкости сравнимой с диаметром критического зародыша и учёте влияния испарения тонких плёнок жидкости. На рис.1 (а,б) представлены кривые кипения для хладона 141b и хладона 1234yf при массовом расходе 400 кг/м²с, точками на графиках показаны экспериментальные данные, пунктирной линией показан расчёт для пузырькового кипения в большем объёме, сплошной линией показан расчёт для насыщенного кипения по методике из работы [3]. В рассмотренных условиях для хладона 141b измеренные значения коэффициентов теплоотдачи существенно превышают расчёт для кипения в большем объёме для тепловых потоков менее 100 кВт/м². Данные хладона 1234yf согласуются с расчётом для кипения в большем объёме во всём диапазоне тепловых потоков. Во всех рассмотренных случаях расчёт по модели из [3] показывает наилучшее соответствие экспериментальным данным во всём диапазоне тепловых потоков.

Участок для исследования теплоотдачи в условиях недогретого кипения состоит из: медного блока с нагревательными картриджами общей мощностью 1200 Вт в верхней части которого фрезерованы два микроканала сечением шириной 2000 мкм глубиной 360 мкм и длиной 16 мм; входной и выходной камеры с датчиками температуры и отборниками давления. По длине микроканалов на расстоянии 3 и 13 мм от входа производится измерение температуры стенки и градиента температуры для определения локального теплового потока. Блок с микроканалами теплоизолирован от входной и выходной камер через паронитовые прокладки толщиной 1 мм. Предустановленный подогреватель позволяет регулировать температуру потока на входе в участок. Организация потока и калибровка датчиков такая же, как и в случае экспериментов с хладонами. Смена участка позволила получать более высокие массовые скорости и тепловые потоки.

В работе получены данные по зависимости температуры стенки от теплового потока для различных массовых расходов и температур потока на входе в микроканалы. Показано существенное влияние начального участка на теплоотдачу в коротком участке, даже в условиях турбулентного потока при наличии недогретого кипения в жидкости. На рис. 2 показана экспериментальная зависимость локального теплового потока от локальной температуры стенки для двух сечений исследованного теплообменника при массовой

скорости $480 \text{ кг/м}^2\text{с}$ и температуре воды на входе в теплообменник $T_0 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Пунктирными линиями показан расчёт зависимости теплового потока от температуры стенки для конвективного теплообмена в условиях эксперимента с учетом начального участка для представленных сечений. Расчет начального участка проведен по методике предложенной в работе [2]. Сплошной линией показан расчёт для недогретого кипения по корреляции из работы [4]. В условиях соответствующих конвективному теплообмену экспериментальные данные хорошо согласуются с известными методами расчёта. Начало кипения точно соответствует расчёту по [4] однако с увеличением плотности теплового потока наблюдается ухудшение теплоотдачи по сравнению с расчётом.

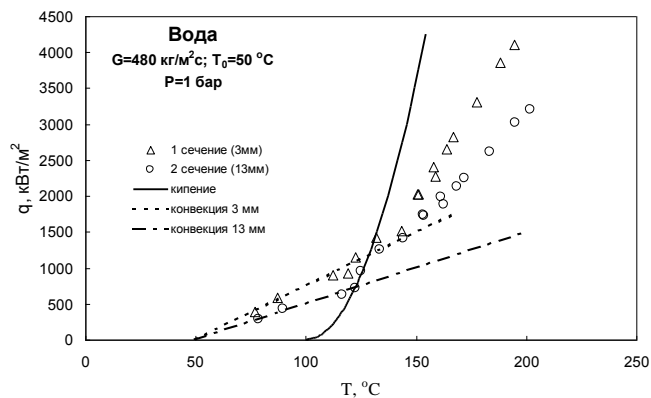


Рис. 2. Зависимость теплового потока от температуры стенки в теплообменнике с каналами $360 \times 2000 \text{ мкм}$ при течении воды с массовой скоростью $480 \text{ кг/м}^2\text{с}$

Работа выполнена поддержке: РФФИ № 15-08-07506 А. и РНФ 16-19-10519.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bertsch S.S, Groll E.A, Garimella S.V.** Composite Heat Transfer Correlation for Saturated Flow Boiling in Small Channels // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52. P. 2110–2118.
2. **Phillips, R.J.**, Forced-Convection, Liquid-Cooled, Microchannel Heat Sinks, / Technical rept. Massachusetts Inst of Tech, Lexington Lincoln Lab, 1988.
3. **Kuznetsov, V.V.; Shamirzaev, A. S.** Flow Boiling Heat Transfer of Refrigerant R-134a in Copper Microchannel Heat Sink // Heat Transfer Engineering, 2016.V 37, No 13-14 P. 1105-1113.
4. **Shah M. M.** New correlation for heat transfer during subcooled boiling in plain channels and annuli //International Journal of Thermal Sciences. – 2017. – Т. 112. – С. 358-370.