

03

Измерение скорости испарения с локальной поверхности слоя жидкости под действием потока газа

© Ю.В. Люлин¹, Д.В. Феоктистов², И.А. Афанасьев²,
Е.С. Чачило², О.А. Кабов^{1,2}, Г.В. Кузнецов²

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Томский политехнический университет

E-mail: lyulin@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 16 января 2015 г.

Выполнено исследование динамики испарения с поверхности слоя жидкости под действием потока газа. Получены корреляционные зависимости расхода испарения от расхода газа и температуры для системы „этанол–воздух“. Проведено сравнение с существующими экспериментальными данными. Установлено, что для исследуемых двухфазных систем зависимость роста скорости испарения с увеличением температуры имеет почти идентичный характер и не зависит от теплофизических свойств жидкости и газа. Характер роста интенсивности испарения при увеличении скорости потока газа существенно зависит от теплофизических свойств жидкости и газа.

Для отвода высоких тепловых потоков (до 1000 W/cm^2) перспективным представляется использование интенсивно испаряющегося слоя жидкости, обтекаемого потоком газа. Подобная концепция реализована в миниразмерных теплообменных системах, применяемых для охлаждения микроэлектронного оборудования [1,2]. Несмотря на повышенный интерес к двухфазным потокам в мини- и микроканалах, экспериментальных [3,4] и теоретических работ [5–7] недостаточно

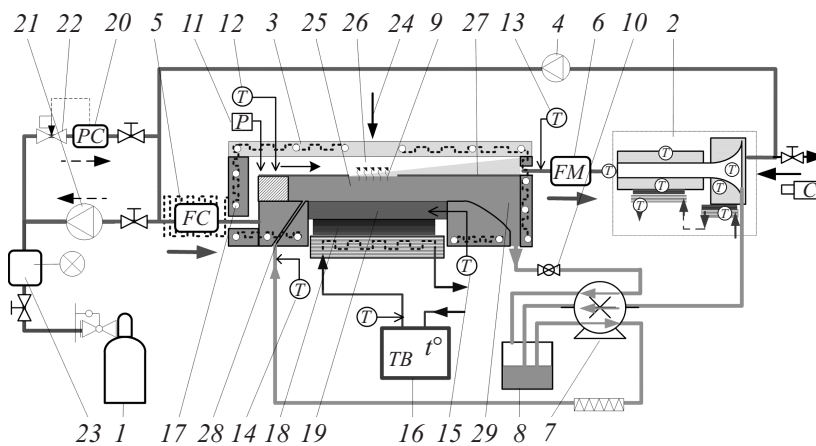


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

для моделирования процессов тепломассопереноса при испарении с локальной поверхности слоя жидкости, обдуваемой потоком газа.

Целью данной работы является экспериментальное изучение влияния температуры и расхода газа, движущегося параллельно слою неподвижной жидкости, на скорость испарения при условиях формирования устойчивой плоской межфазной границы раздела „жидкость–газ“.

Исследования проведены на установке, общая схема которой представлена на рис. 1. Концепция эксперимента включает использование апробированных ранее в [4] методов изучения конвекции, развития структуры течений и тепломассопереноса в горизонтальном неподвижном слое жидкости под действием потока газа. Новая установка (рис. 1) отличается от известной [4] реализацией на рабочем участке движения слоя жидкости параллельно потоку газа, использованием более точных систем контроля и измерения, расширением диапазона изменения параметров потока газа и жидкости (по температурам от 10 до 70°C, по расходу газа от 100 до 1000 $\mu\text{l}/\text{min}$ ($\text{Re} = 30\text{--}3000$), по расходу жидкости от 0.03 до 100 $\mu\text{l}/\text{min}$). Использование конденсационно-сепарационной системы позволяет контролировать концентрацию пара в парогазовой смеси, а применение регулятора давления и вакуумного насоса — изменять давление в системе „жидкость–газ“ от 0.05 до 0.1 МПа.

Последовательность действий при проведении эксперимента: газ из баллона 1 поступает в закрытый контур, после заполнения которого парогазовая смесь (в зависимости от настройки конденсационно-сепарационной системы 2) циркулирует в контуре через участок 3 при работе циркуляционного газового насоса 4. Расход газового потока на входе рабочего участка контролируется регулятором расхода 5, на выходе измеряется расходомером 6. Поступающая в конденсационно-сепарационную систему 2 часть пара (парогазовой смеси) конденсируется. Конденсат через сепаратор при помощи перистальтического насоса 7 откачивается в контейнер 8 с исходной жидкостью. Насос 7 предназначен для поддержания постоянного уровня испаряющегося слоя жидкости в зоне испарения 9. Неиспарившаяся жидкость возвращается в контейнер 8. При закрытии вентиля 10 происходит переход в режим работы с неподвижным слоем жидкости. Давление газа измеряется датчиком 11, температура газа и жидкости — термисторами 12–13 и 14–15 (соответственно на входе и выходе рабочего участка). Температура газа термостабилизируется дистиллированной водой с заданной температурой, которая прокачивается термостатом 16 через каналы 17.

Термоэлектрический модуль 18, нагревающий медную пластину 19, обеспечивает необходимую разницу температур между газом и испаряющейся жидкостью. Регулятор давления 20 и вакуумный насос 21 применяются для контроля давления газа. При понижении давления в закрытом контуре ниже заданного автоматически открывается клапан регулятора 22 и газ из резервуара 23 поступает в рабочий участок. Контроль положения межфазной границы раздела проводился теневым методом 24 [4].

Рабочий участок состоит из жидкостной камеры 25 (шириной 40 mm и изменяемой высотой от 1 до 10 mm) и газового канала 26 прямоугольного поперечного сечения (высотой 3 mm, шириной 40 mm, длиной 150 μm). Верхняя стенка жидкостного канала — пластина 27 из нержавеющей стали толщиной 200 mm с квадратным вырезом, в котором происходит контакт жидкости и газа и формируется локальная область испарения 9. Пластина может устанавливаться с различными размерами выреза. Жидкость подается через щелевое сопло 28, проходя через камеру 25, испаряется и попадает в зону слива 29.

Расход пара в процессе испарения с поверхности слоя жидкости, обдуваемой потоком газа, контролировался двумя методами, апроби-

1* Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 14

рованными в [4] (по определению среднего расхода жидкости и по измерению разницы массовых расходов на входе и выходе из рабочего участка потока газа).

Эксперименты проводились при атмосферном давлении в рабочем участке. В качестве неподвижного слоя жидкости толщиной 3 мм использовался этанол (95 mass %, ГОСТ Р 51723-2001). Поверхность испарения, обдуваемая потоком газа (воздуха), была постоянной (100 мм²). Проведены две серии опытов. В первой поддерживался постоянный расход газа 500 μl/min, что соответствует средней скорости газа в рабочем участке 0.060 м/с. Температура системы „жидкость–газ“ изменялась от 20 до 40 °С с шагом 5 °С с погрешностью не более 0.1 °С. Во второй серии экспериментов расход газа варьировался от 100 до 500 μl/min с шагом 100 μl/min, что соответствует средней скорости газа от 0.0139 до 0.0694 м/с. Температура жидкости и газа была постоянной 25 °С.

На рис. 2, а представлены зависимости массовой скорости испарения от температуры при постоянной средней скорости потока газа для системы „этанол–воздух“ (первая серия экспериментов — линия 1) и результаты [4] для системы „HFE-7100–азот“ (линия 2). Установлено, что при повышении температуры (T) системы „жидкость–газ“ возрастает массовая скорость испарения жидкости, наиболее вероятно, это является следствием увеличения кинетической энергии молекул при возрастании температуры. Зависимости $Q_l(T)$ массовой скорости испарения от температуры (рис. 2) близки к линейным в логарифмических координатах и хорошо описываются степенными функциями

система „этанол–воздух“

$$Q_l = C_1 T^{1.22}, \quad (1)$$

система „HFE-7100–азот“

$$Q_l = C_2 T^{1.17}, \quad (2)$$

где Q_l — массовая скорость испарения $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$; T — температура жидкости и газа, °С; $C_1 = 2.0 \cdot 10^{-5}$ и $C_2 = 1.0 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{°C})$ для этанола и HFE-7100 соответственно. Сопоставляя выражения (1) и (2), необходимо отметить сравнительно близкие значения показателей степени. Их отличие составляет менее 5%. Соответственно углы наклона линий 1 и 2 на рис. 2 также близки по значению. На основании этого можно сделать вывод, что зависимость скорости испарения от

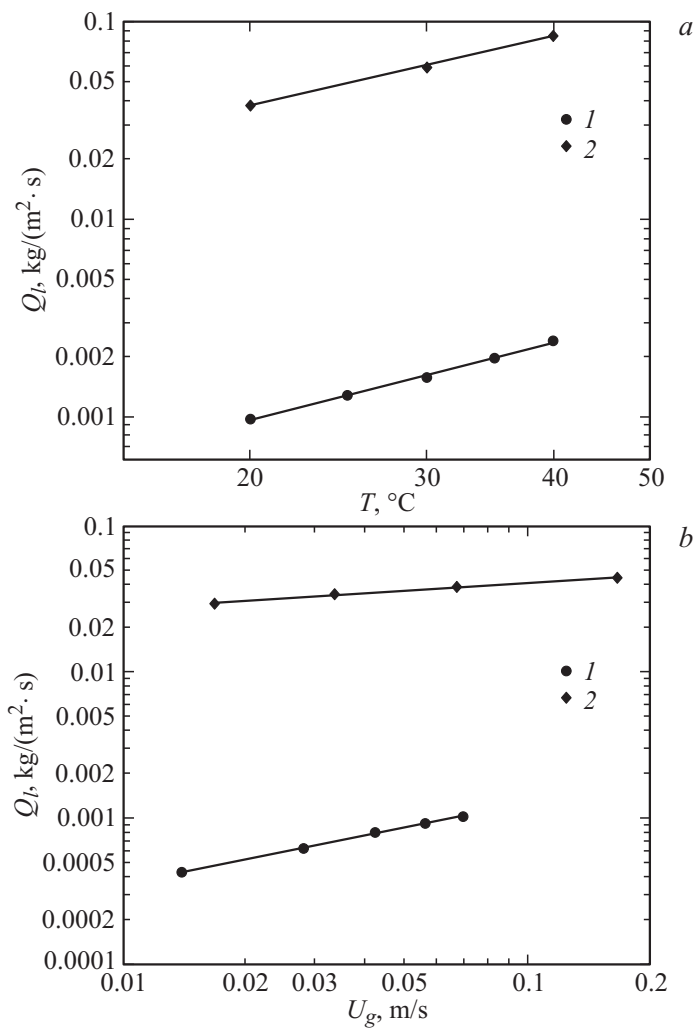


Рис. 2. Зависимость массовой скорости испарения от температуры при скорости газа 0.06 m/s (a) и от средней скорости потока газа при температуре жидкости и газа 25°C (b). 1 — „этанол–воздух“; 2 — „HFE-7100–азот“ [4].

температуры жидкости и газа для различных жидкостей имеет почти идентичный характер.

На рис. 2, *b* представлены зависимости массовой скорости испарения от средней скорости потока газа (при одинаковой температуре жидкости и газа) для системы „этанол–воздух“ (вторая серия экспериментов — линия 1) и результаты [4] для системы „HFE-7100–азот“ (линия 2). Установлено, что Q_l увеличивается при увеличении скорости потока газа.

Представленные на рис. 2, *b* зависимости Q_l от U_g описываются следующими степенными аппроксимациями:

система „этанол–воздух“

$$Q_l = B_1 U_g^{0.54}, \quad (3)$$

система „HFE-7100–азот“

$$Q_l = B_2 U_g^{0.176}, \quad (4)$$

где U_g — средняя скорость потока газа, м/с; $B_1 = 4.0 \cdot 10^{-3}$ и $B_2 = 6.0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ для этанола и HFE-7100 соответственно.

Показатели степени в аппроксимациях (3) и (4) отличаются более, чем на 65%, что отражается в разных углах наклона линий 1 и 2 на рис. 2, *b*. Это указывает на то, что рост скорости испарения при увеличении средней скорости газа существенно зависит от свойств рабочих жидкостей.

Известно, что скрытая теплота парообразования жидкости HFE-7100 в 8 раз меньше, чем у этанола. Вследствие этого зависимости $Q_l(T)$ и $Q_l(U_g)$ на рис. 2, *a, b* для системы „HFE-7100–азот“ находятся существенно выше, чем для системы „этанол–воздух“. Кроме того, при атмосферном давлении температура кипения HFE-7100 (61°C) меньше, чем у этанола (78°C) на 17°C. Соответственно в одних и тех же условиях подвода теплоты со стороны подложки HFE-7100 испаряется заметно интенсивней. Можно сделать вывод, что константы при степенных зависимостях (1)–(4) зависят только от теплофизических параметров жидкости и газа.

Таким образом, выполнено исследование динамики испарения в слое жидкости под действием потока газа. Получены корреляционные зависимости расхода испарения от расхода газа и температуры для системы

„этанол–воздух“. Проведено сравнение с известными экспериментальными данными. Установлено, что для исследуемых двухфазных систем зависимость роста скорости испарения с увеличением температуры имеет почти идентичный характер и не зависит от теплофизических свойств жидкости и газа. Характер роста интенсивности испарения при увеличении скорости потока газа существенно зависит от теплофизических свойств жидкости и газа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-38-50008, 14-08-00163) и Минобрнауки России (идентификатор проекта RFMEFI61314X0011), а также в рамках госзадания „Наука“ (шифр Федеральной целевой научно-технической программы 2.1410.2014).

Список литературы

- [1] Кабов О.А., Кабова Ю.О., Кузнецов В.В. // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446. № 5. С. 522–526.
- [2] Houshmand F., Peles Y. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 64. P. 42–52.
- [3] Scheid B., Margerit J., Iorio C. S., Joannes L., Heraud M., Queeckers P., Dauby P.C., Colinet P. // Experiments in Fluids. 2012. V. 52. P. 1107–1119.
- [4] Lyulin Y., Kabov O. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2014. V. 70. P. 599–609.
- [5] Goncharova O.N., Kabov O.A. // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2010. V. 53. P. 2795–2807.
- [6] Goncharova O.N., Hennenberg M., Rezanova E.V., Kabov O.A. // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2013. V. 1. P. 317–338.
- [7] Nepomnyaschy A., Simanovskii I., Legros J.C. // Interfacial Convection in Multilayer Systems. 2 ed. New York: Springer, 2012.