

03

Режимы с интенсификацией теплообмена при испарении в тонких горизонтальных слоях жидкости при пониженных давлениях

© В.И. Жуков¹, А.Н. Павленко²

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: vizh@inbox.ru

Поступило в Редакцию 21 февраля 2018 г.

Выполнен анализ влияния на теплообмен структур, образующихся при испарении и кипении в горизонтальных тонких слоях жидкости (н-додекана). В слоях с толщиной более капиллярной постоянной при низких давлениях под действием реактивной силы фазового перехода образуются структуры в форме „воронок“ и „кратеров“. При повышении давления возникает пузырьковое кипение. Показано, что образование структур в форме „воронок“ и „кратеров“ в режиме интенсивного испарения при низком приведенном давлении ведет к увеличению коэффициента теплоотдачи при аналогичных значениях высоты слоя примерно на 70% по сравнению с таковым в случае пузырькового кипения.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.12.46285.17263

Тонкие пленки жидкости применяются для охлаждения поверхностей нагрева, когда необходимо обеспечить отвод высоких плотностей теплового потока при малых температурных напорах. Теоретические и экспериментальные исследования гидродинамики, механизмов интенсификации теплообмена в стекающих по вертикальным поверхностям тонких пленках приведены в [1–3]. В ряде технологических устройств, систем охлаждения и термостабилизации используются горизонтальные тонкие пленки жидкости. В [4] исследовался теплообмен при интенсивном испарении слоя жидкости, обтекаемого потоком газа. Экспериментально изучалось влияние температуры и расхода газа, движущегося параллельно слою неподвижной жидкости, на скорость

испарения при условиях формирования устойчивой межфазной границы раздела жидкость–газ. В исследовании [5] необходимая толщина пленки обеспечивалась подтеканием жидкости в зазор между поверхностью нагрева и нанопористой мембраной под действием давления гидростатического столба. Тепло отводилось в режиме испарения при поперечном натекании на мембрану струи воздуха. Для понижения температуры охлаждаемых поверхностей в ряде случаев используют пониженное давление. В [6] исследовался теплообмен при пониженном давлении при испарении жидкости из пористого слоя спеченных металлических частиц. Экспериментальные данные по кипению в большом объеме сравнивались с результатами исследования теплообмена при кипении на плоской поверхности без покрытия. В экспериментах в тонкой пленке не наблюдалось образования пузырьков пара. Жидкость подтекала по периферии пористого слоя к поверхности нагрева. Уровень жидкости в пористом слое мог снижаться при больших тепловых потоках. В исследованиях [5,6] расчет теплообмена осложнен необходимостью учета геометрических и структурных характеристик слоев, в которых происходит течение и испарение жидкости.

В настоящей работе приводятся результаты исследования теплообмена при пониженных давлениях в тонких слоях *n*-додекана со свободной верхней границей.

Исследования проводились на экспериментальной установке, детальное описание которой приведено в [7]. Рабочий участок установки по конструктивному исполнению представлял собой термосифон. Испаряющаяся жидкость конденсировалась на вертикальных стенках рабочего участка и стекала вниз, натекая на поверхность нагрева диаметром 120 мм по периферии. Для фиксации результатов наблюдений применялась видеокамера, позволяющая проводить высокоскоростную видеосъемку с частотой 240 fps. Температура измерялась термопарами. Давление в рабочей камере измерялось деформационно-ионизационным датчиком вакуума и поддерживалось постоянным путем регулировки с помощью натекателя и вентиля. Погрешность измерения давления не превышала $\pm 0.3\%$ от текущих значений. В качестве рабочей жидкости использовался *n*-додекан. В экспериментах были получены кривые кипения при постоянных значениях давления. Основная часть экспериментов проводилась при давлениях над слоем $P(P/P_{cr})$: $67(3.7 \cdot 10^{-5})$, $133(7.4 \cdot 10^{-5})$, $10^3(5.5 \cdot 10^{-4})$, $10^4(5.5 \cdot 10^{-3})$, $2 \cdot 10^4(0.011)$, где P и P_{cr} — давление над слоем и критическое давление соответственно [Pa].

a

Рис. 1. Фотографии структур, наблюдавшихся в слоях *n*-додекана. *a* — „воронки“, высота слоя $h = 4.0$ mm, давление в объеме $P = 67$ Pa, $q = 9070$ W/m²; *b* — „кратеры“, $h = 4.0$ mm, $P = 133$ Pa, $q = 15\,200$ W/m².

Высота слоя, при которой проводились эксперименты, изменялась от капиллярной постоянной ($l = 1.78$ mm) и выше; $h(h/l_\sigma)$: 1.7(0.99), 2.5(1.45), 4(2.32), где h — высота слоя [mm], h/l_σ — безразмерная высота слоя.

Как показывает визуализация процесса, при низких давлениях $P \leq 10^3$ Pa ($P/P_{cr} \leq 5.5 \cdot 10^{-4}$) пузырьковое кипение отсутствовало. Теплообмен осуществлялся за счет интенсивного испарения с верхней границы слоя жидкости при образовании в нем под действием

b**Рис. 1** (продолжение).

реактивной силы фазового перехода структур в форме „воронок“ и „кратеров“ (рис. 1). „Кратеры“, как правило, образовывались на месте массива „воронок“ и имели в центре протяженный плоский остаточный слой жидкости конечных размеров, покрытый в данном случае каплями жидкости (рис. 1, *b*). Такие же структуры наблюдались в более ранних работах [7–9] при изучении процессов в тонких слоях вакуумных масел. В настоящей работе в отличие от [7–9] использовался *n*-додекан, являющийся однокомпонентной жидкостью, для которой однозначно определено критическое давление P_{cr} . При низких тепловых потоках в слоях наблюдались „воронки“ и „кратеры“, при высоких тепловых

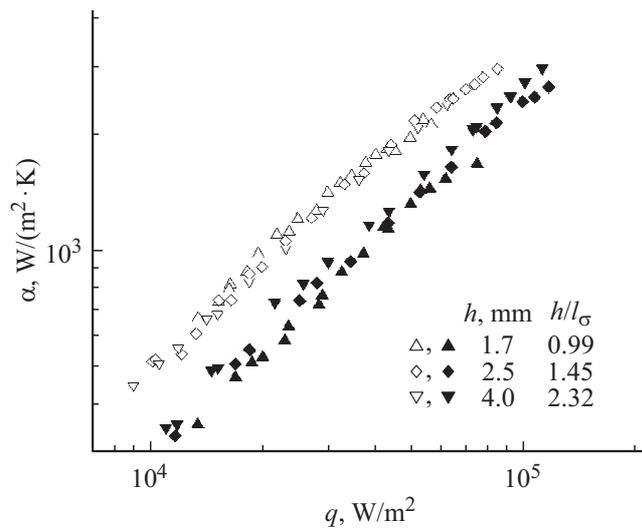


Рис. 2. Зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока. Светлые символы соответствуют давлению над слоем $P = 133 \text{ Pa}$ ($P/P_{cr} = 7.4 \cdot 10^{-5}$), в слое присутствуют „воронки“ и „кратеры“. Темные символы соответствуют давлению над слоем $P = 10^4 \text{ Pa}$ ($P/P_{cr} = 5.5 \cdot 10^{-3}$), режим пузырькового кипения.

потоках — „кратеры“. При давлении $P \geq 10^4 \text{ Pa}$ ($P/P_{cr} \geq 5.5 \cdot 10^{-3}$) во всех слоях наблюдалось пузырьковое кипение.

В экспериментах с водой [6], выполненных при давлении 9.6 kPa , пузырьковое кипение не наблюдалось. Приведенное давление ($P/P_{cr} = 4.3 \cdot 10^{-4}$, при котором проводились эксперименты в [6], также входит в область низких приведенных давлений ($P/P_{cr} \leq 5.5 \cdot 10^{-4}$), определенную в данной работе, где отсутствует пузырьковое кипение.

Давление является одним из важнейших независимых параметров, влияющих на теплоотдачу при пузырьковом кипении. Увеличение давления приводит к интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении. Одно из расчетных уравнений, учитывающее в явном виде влияние давления, приводится в [10].

На рис. 2 приведено сравнение коэффициентов теплоотдачи α в зависимости от плотности теплового потока q для слоев с высотой

порядка капиллярной постоянной и выше при двух значениях давления. Из данных, представленных на рис. 2, следует важный вывод, что появление в слое жидкости „воронок“ и „кратеров“ увеличивает коэффициент теплоотдачи при уменьшении давления в исследованном диапазоне в слоях жидкости высотой порядка капиллярной постоянной и выше примерно на 70% по сравнению с таковым в случае режима пузырькового кипения. Повышение давления в режиме пузырькового кипения вызывало рост коэффициента теплоотдачи. Экспериментальные данные, соответствующие давлениям 67 Па ($P/P_{cr} = 3.7 \cdot 10^{-5}$) и 10³ Па ($P/P_{cr} = 5.5 \cdot 10^{-4}$), полученные в режиме испарения, когда в слое присутствуют „воронки“ и „кратеры“, совпадали с результатами, приведенными на рис. 2 для этого режима, в пределах погрешности измерений.

Таким образом, в работе установлено, что изменение механизма теплоотдачи, вызванное при понижении давления формированием в тонком слое жидкости структур в форме „воронок“ и „кратеров“, приводит к интенсификации теплообмена примерно на 70% по сравнению с теплообменом при пузырьковом кипении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 18-08-00545-а: блок экспериментальных исследований по изучению теплоотдачи при кипении и испарении в тонких горизонтальных слоях жидкости при пониженных давлениях) и гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010: блок по высокоскоростной визуализации переходных процессов и изучению структурообразования в тонких горизонтальных слоях жидкости при интенсивном испарении).

Список литературы

- [1] Чиннов Е.А., Шатский Е.Н. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 19. С. 46–54.
- [2] Шатский Е.Н., Чиннов Е.А., Зайцев Д.В., Семенов А.А., Кабов О.А. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 23. С. 69–76.
- [3] Павленко А.Н., Li X., Li H., Gao X., Володин О.А., Суртаев А.С., Сердюков В.С. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 16. С. 21–28.
- [4] Люлин Ю.В., Феоктистов Д.В., Афанасьев И.А., Чачило Е.С., Кабов О.А., Кузнецов Г.В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 14. С. 1–7.
- [5] Narayanan S., Fedorov A.G., Joshi Y.K. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 58. Iss. 1-2. P. 300–311.

-
- [6] *Hong F.J., Cheng P., Wu H.Y., Sun Z.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 63. P. 389–400.
- [7] *Жуков В.И., Павленко А.Н., Нагайцева Ю.В., Вайсс Д.* // ТВТ. 2015. Т. 53. № 5. С. 727–734.
- [8] *Zhukov V.I., Pavlenko A.N.* // J. Eng. Thermophys. 2013. V. 22. Iss. 4. P. 257–287.
- [9] *Гогонин И.И., Дорохов А.Р., Жуков В.И.* // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1989. В. 3. С. 8–13.
- [10] *Боришанский В.М., Козырев А.П., Светлова Л.С.* // ТВТ. 1964. Т. 2. № 1. С. 119–121.