

УДК 532.529.2

Влияние протяжённости межфазной поверхности на интенсивность испарения горизонтального слоя жидкости под действием потока газа *

**Ю.В. Люлин^{1,2}, О.А. Кабов^{2,4}, Г.В. Кузнецов³, Д.В. Феоктистов³,
К.О. Пономарев³**

¹*Центр энергетических технологий, Сколковский институт науки и технологий, Москва*

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

³*Томский политехнический университет*

⁴*Новосибирский государственный университет*

E-mail: Y.Lyulin@skoltech.ru

Экспериментально исследована динамика испарения с поверхности горизонтального слоя жидкости (этанола) ограниченного размера под действием потока газа (воздуха). Изучено влияние продольного размера межфазной поверхности (0,01–0,03 м) на удельную массовую скорость испарения. Установлено, что удельная массовая скорость испарения уменьшается с увеличением протяжённости межфазной поверхности вследствие уменьшения градиента концентрации пара в пограничном слое.

Ключевые слова: испарение, конвекция, термокапиллярная граница раздела, двухфазные течения.

Изучение процессов тепломассопереноса в условиях испарения тонких слоев жидкости при локальном их нагреве является актуальной задачей теплофизики [1]. Проведение исследований в рамках этой задачи необходимо для разработки современных методов охлаждения теплонапряженного оборудования, обеспечения допустимого температурного режима работы устройств и приборов с малыми геометрическими размерами. Конвективные течения жидкостей, сопровождающиеся испарением со свободной поверхности, которые возникают под действием параллельно движущегося потока газа, изучались экспериментально [2–4] и теоретически [5–10]. Известно [5], что испарение теплоносителя в воздух или инертный газ уменьшает скорость этого фазового перехода в результате роста концентрации пара в пограничном слое. Однако в работе [6] было показано, что наличие инертного газа способствует возникновению неустойчивости в слое жидкости, обусловленной действием поверхностного натяжения (эффекта Марангони), и может интенсифицировать тепломассобмен от поверхности раздела жидкости и газа. В работах [7, 8] были построены точные решения стационарной задачи конвективного течения

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-79-10258).

в горизонтальном слое жидкости под действием потока инертного газа. Результаты численного расчета скорости испарения с межфазной поверхности и их сравнение с экспериментальными данными представлены в исследовании [9]. Было установлено, что высота слоя жидкости оказывает влияние на структуру конвективных течений и удельный массовый поток пара с межфазной поверхности. Авторами [11] было обнаружено, что в условиях увеличения высоты слоя жидкости и его нагрева с нижней стороны на фоне течения основного масштаба появляются течения меньших размеров за счет подвода теплоты.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния протяженности межфазной поверхности на интенсивность испарения неподвижного слоя жидкости, обдуваемого потоком воздуха.

Концепция эксперимента схематично изображена на рис. 1 и включает использование апробированных ранее (см. [3, 4]) методов изучения тепломассопереноса от межфазной поверхности раздела жидкости и газа. Работа установки осуществлялась следующим образом. Воздух с помощью мембранного насоса 1 поступал в рабочий контур 2. Расход газа на входе контролировался регулятором 3, а на выходе измерялся расходомером 4. Перистальтический насос 5 использовался для нагнетания жидкости в рабочий участок из контейнера 6, предназначенного для поддержания постоянного уровня испаряющегося слоя жидкости в зоне испарения 7. Давление воздуха на входе в рабочий контур измерялось датчиком 8. Рабочий участок состоял из основания 9 и рамки 10, формирующей жидкостную камеру 11 шириной 40 мм. Высота жидкостной камеры регулировалась толщиной рамки 10 в пределах от 1 до 10 мм. Газовый канал 14 прямоугольного поперечного сечения (высотой 3 мм, шириной 40 мм, длиной 150 мм) состоял из верхней крышки 12 и рамки 13. Верхняя стенка жидкостной камеры 11 образована металлической пластиной 15, изготовленной из нержавеющей стали толщиной 200 мкм, с вырезом в форме квадрата, в котором в условиях контакта жидкости и газа формировалась локальная область испарения 7. Пластина устанавливалась между металлическими рамками 10 и 13

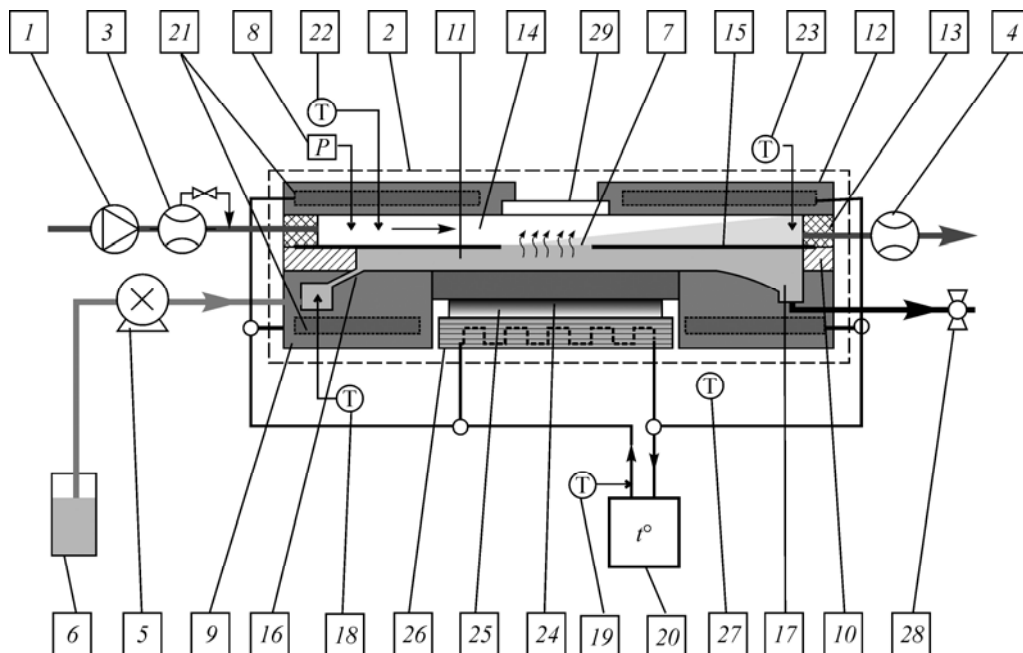


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

по периметру рабочего участка. Конструкция исключала деформацию и вибрацию пластины во время проведения экспериментов. Жидкость подавалась в канал через щелевое сопло 16. Проходя камеру 11, она испарялась и попадала в зону слива 17. Температура жидкости на входе в рабочий участок измерялась с помощью термистора 18. Термостабилизация рабочего участка обеспечивалась тем, что вода с заданной температурой 19 из термостата 20 прокачивалась через продольные круглые каналы 21 в крышке и основании рабочего участка. Температура газа измерялась на входе и выходе рабочего участка с помощью термисторов 22 и 23. По результатам серии экспериментов без использования рабочей жидкости было установлено, что температура газового потока равна температуре крышки и основания. Соответственно температура жидкости в рабочем участке принималась равной температуре основания медной подложки 24, которая регулировалась термоэлектрическим модулем 25 и теплообменником 26. Температура медной подложки измерялась термистором 27, который был установлен на расстоянии 1 мм от верхней поверхности. Регулировка температурного режима проводилась таким образом, чтобы разница между температурой медной подложки 27 и температурой газа на входе в рабочий участок 22 составляла менее 0,1 °С. Эксперименты с неподвижным слоем проводились в условиях закрытого вентиля 28.

Расход пара при испарении слоя жидкости, обтекаемой потоком газа, определялся двумя апробированными методами [2, 3]. Первый метод основан на определении среднего расхода жидкости, необходимого для поддержания на заданном уровне постоянного объема теплоносителя в жидкостной камере. Расход подаваемой насосом 5 жидкости соответствовал расходу испарения с межфазной поверхности. Контроль положения плоской межфазной поверхности с точностью ± 10 мкм проводился с использованием оборудования теневого метода через прозрачное окно 29. Второй метод основан на измерении массовых расходов воздуха на входе в рабочий участок и парогазовой смеси воздуха и паров этанола на выходе. В качестве основного метода определения расхода пара при испарении жидкости с межфазной поверхности использовался первый метод. Необходимо отметить, что этот метод определения скорости испарения не зависит от свойств поступающего в рабочий участок газового потока, например, влажности. Точность данного метода определялась точностью жидкостного насоса и возможностью поддержания уровня межфазной поверхности в плоском состоянии. Погрешность измерения скорости испарения не превышала 15 %. Подробное описание методов определения скорости испарения, а также теневого метода, представлено в работе [2].

Эксперименты проводились при атмосферном давлении в рабочем участке и неподвижном слое жидкости толщиной 3 мм. В качестве рабочей жидкости использовался этанол (95 % (масс.), ГОСТ Р 51723-2001). Размеры вырезов в пластине составляли 10×10, 15×15, 20×20, 25×25 и 30×30 мм, что соответствует площади от $1 \cdot 10^{-4}$ до $9 \cdot 10^{-4}$ м². Средняя скорость газа варьировалась от 0,014 до 0,14 м/с. Температура системы «этанол–воздух» поддерживалась постоянной и равнялась 20 °С. Температура окружающей среды и влажность воздуха составляли 22–23 °С и 35 ± 2 % соответственно.

На рис. 2 и 3 представлены экспериментальные зависимости удельной массовой скорости испа-

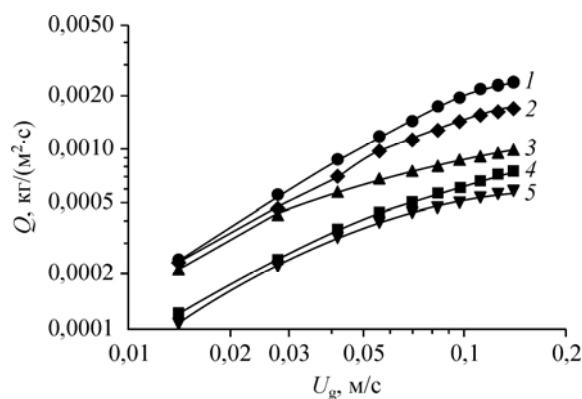


Рис. 2. Зависимости удельной массовой скорости испарения от средней скорости потока газа.

$L = 0,01$ (1), $0,015$ (2), $0,02$ (3), $0,025$ (4), $0,03$ (5) м.

рения Q от средней скорости потока газа U_g и протяженности межфазной поверхности L . Установлено, что увеличение продольного размера межфазной поверхности уменьшает удельную скорость испарения. Кривые на рис. 2 с ростом продольного размера межфазной поверхности становятся более пологими. Влияние скорости газа на удельную массовую скорость испарения с поверхности жидкости снижается с увеличением протяженности зоны испарения. То есть для больших скоростей газа (0,069 и 0,14 м/с) влияние размеров зоны испарения проявляется в существенно большей степени. Этот факт хорошо проиллюстрирован на рис. 3. Для скорости газа 0,014 м/с форма зависимости удельной массовой скорости испарения от продольного размера межфазной поверхности близка к линейной и описывается функцией $Q = a + b \cdot S$, где Q — удельная массовая скорость испарения, кг/(м²·с); S — площадь испарения, м²; $a = 1,9 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с) и $b = 2,6 \cdot 10^{-4}$ кг/(м⁴·с) — коэффициенты линейной функции. Для скоростей газа 0,069 и 0,14 м/с зависимость становится существенно нелинейной. Значительное влияние геометрических размеров зоны испарения проявляется при малом ее продольном размере площади (0,01 м на рис. 3). Концентрация пара этанола в потоке воздуха у свободной межфазной поверхности соответствует давлению насыщенного пара при данной температуре поверхности жидкости. Пар переносится от границы «жидкость–газ» за счет вынужденной конвекции, а также в результате диффузии. У поверхности образуется концентрационный пограничный слой. При увеличении продольного размера межфазной поверхности толщина пограничного слоя возрастает. Скорость испарения с поверхности жидкости снижается за счет уменьшения градиента концентрации пара этанола вблизи межфазной поверхности. В проведенной серии экспериментов использовалась квадратная геометрия межфазной поверхности. Влияние поперечного размера межфазной поверхности не рассматривалось.

Интенсивное испарение горизонтального слоя жидкости в потоке движущегося газа вызывает понижение температуры поверхности [3]. Температура газа поддерживалась близкой к температуре нижней стенки рабочего участка (отклонение составляло не более 0,1 °С), вследствие этого понижение температуры поверхности жидкости обуславливалось только испарением. Поверхность жидкости охлаждается и образуется поперечный градиент температуры между межфазной поверхностью и слоем жидкости, контактирующей с нижней стенкой рабочего участка. Поперечный градиент создает термогравитационную конвекцию. Последняя зависит от разности температур между поверхностью слоя и дном, а также от высоты слоя [9]. Необходимо отметить, что межфазная поверхность раздела охлаждается неравномерно, поскольку скорость испарения снижается вдоль поверхности слоя жидкости по направлению потока газа. Наиболее интенсивное испарение имеет место на линии первоначального соприкосновения газа и жидкости [3].

Таким образом, неравномерное испарение вызывает градиент температуры в продольном направлении поверхности раздела фаз. Этот градиент температуры на межфазной поверхности инициирует движение жидкости по поверхности слоя в обратном направлении потока воздуха [3] за счет термокапиллярного эффекта. Следовательно, можно

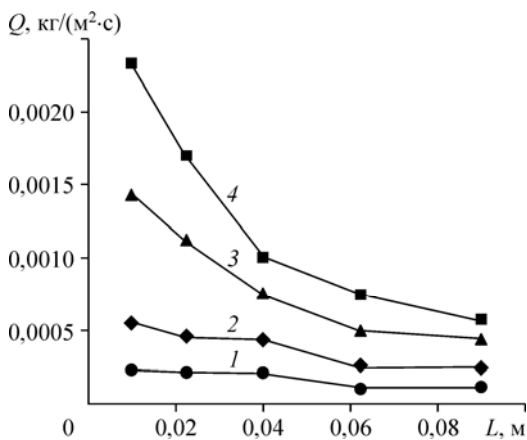


Рис. 3. Зависимость удельной массовой скорости испарения от продольного размера межфазной поверхности.

$U_g = 0,014$ (1), 0,028 (2), 0,069 (3), 0,14 (4) м/с.

сделать вывод о том, что механизм формирования конвекции в слое жидкости и интенсивность испарения зависят от соотношения скорости потока газа и длины межфазной поверхности.

По результатам анализа рис. 2 при малых расходах газа установлено двукратное уменьшение удельной скорости испарения при изменении продольного размера межфазной поверхности от 0,02 м до 0,025 м. В работах [3, 9] экспериментально и по результатам математического моделирования было показано, что при изменении толщины слоя удельная скорость испарения с межфазной поверхности имеет локальный максимум. Кроме того, было обнаружено, что максимальная скорость испарения достигается в случае устойчивых и равномерных конвективных течений жидкости. Таким образом, в зависимости от геометрических параметров слоя жидкости существуют структуры конвективных течений, которые могут приводить к увеличению или уменьшению скорости испарения с поверхности раздела жидкости и газа. Изменение протяженности межфазной поверхности также может приводить к перестройке структуры конвективных течений, при которой происходит изменение (уменьшение) скорости испарения с поверхности раздела жидкости и газа, что зарегистрировано в настоящем эксперименте (рис. 2).

Список литературы

1. Kabova Yu., Kuznetsov V., Ohta H., Kabov O. Dynamics and evaporation of a thin locally heated liquid film sheared by a vapor flow in a microchannel // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2017. Vol. 5, No. 3. P. 231–249.
2. Lyulin Yu.V., Kabov O.A. Evaporative convection in a horizontal liquid layer under shear-stress // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 70. P. 599–609.
3. Люлин Ю.В., Феоктистов Д.В., Афанасьев И.А., Чачило Е.С., Кабов О.А., Кузнецов Г.В. Измерение скорости испарения с локальной поверхности слоя жидкости под действием потока газа // *Письма в журн. техн. физики*. 2015. Т. 41, № 14. С. 1–7.
4. Scheid B., Margerit J., Iorio C.S., Joannes L. Héraud M., Queeckaers P., Dauby P.C., Colinet P. Onset of thermal ripples at the interface of an evaporating liquid under a flow of inert gas // *Experiments in Fluids*. 2012. Vol. 52. P. 1107–1119.
5. Sultan E., Boudaoud A., Ben Amar M. Evaporation of a thin film: diffusion of the vapour and Marangoni instabilities // *J. Fluid Mech.* 2005. Vol. 543. P. 183–202.
6. Nepomnyaschy A., Simanovskii I., Braverman L. Stability of thermocapillary flows with inclined temperature gradient // *J. Fluid Mech.* 2001. Vol. 442. P. 141–155.
7. Гончарова О.Н., Резанова Е.В., Люлин Ю.В., Кабов О.А. Изучение конвективных течений жидкости и спутного потока газа с учетом испарения // *Теплофизика высоких температур*. 2017. Т. 55, № 6. С. 720–732.
8. Goncharova O.N., Hennenberg M., Rezanova E.V., Kabov O.A. Modeling of the convective fluid flows with evaporation in the two-layer systems // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2013. Vol. 1, No. 3. P. 317–338.
9. Machrafi H., Lyulin Y., Iorio C.S., Kabov O. A., Dauby P.C. Numerical parametric study of the evaporation rate of a liquid under a shear gas flow: experimental validation and the importance of confinement on the convection cells and the evaporation rate // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 2018. Vol. 72. P. 8–19.
10. Bekezhanova V., Kabov O. Influence of internal energy variations of the interface on the stability of film flow // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2016. Vol. 4, No. 2–3. P. 133–156.
11. Бердников В.С., Гапонов В.А., Гришков В.А., Лиханский П.М., Марков В.А. Влияние нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на распределение температуры в тонкой вертикальной стенке // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17, № 2. С. 197–208.

*Статья поступила в редакцию 30 апреля 2019 г.,
после доработки — 5 июля 2019 г.,
принята к публикации 26 августа 2019 г.*