

УДК 536.5:536.24

Экспериментальное исследование температурного поля в двухслойной системе жидкость–газ^{*}

Е.Я. Гатапова¹, Р.А. Филипенко^{1,2}, Ю.В. Люлин¹, И.А. Граур³,
И.В. Марчук^{1,2}, О.А. Кабов^{1,4}

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

²Новосибирский государственный университет

³Университет Экс Марсель, Марсель, Франция

⁴Томский политехнический университет

E-mail: gatarova@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования температурного поля в двухслойной системе жидкость–газ поперек слоев при локальном нагреве жидкости со стороны подложки и при интенсивном испарении жидкости. Отработана методика измерения профиля температуры по всей толщине слоев жидкости и газа, а также на межфазной границе с помощью прецизионной подвижки с шагом 1 мкм и микротермопары в условиях интенсивного испарения. Установлено существование скачка температуры на межфазной границе, значение которого растет с увеличением температуры. Получена подробная картина температурного поля в области межфазной границы с помощью прецизионной подвижки с малым шагом.

Ключевые слова: микротермопара, граница раздела жидкость–газ, скачок температуры, испарение.

В электронных системах, например, дата-центрах и мобильных устройствах, наблюдаются многочисленные проблемы, связанные с тепловыми нагрузками. Устройства следующего поколения могут обладать большими тепловыми потоками и импульсными нагрузками [1], сочетание которых потребует нового уровня управления температурным режимом. Двухфазные охлаждающие системы представляют особый интерес для применения в системах охлаждения из-за больших коэффициентов теплоотдачи [2]. Скрытая теплота парообразования при двухфазном течении обычно обеспечивает гораздо большую охлаждающую способность по сравнению с аналогичными возможностями однофазного течения, что позволяет использовать небольшие массовые расходы жидкости. Однако существует ряд проблем, касающихся надежности и эффективности двухфазных охлаждающих систем, поэтому требуется тщательное изучение процессов теплообмена в них. Исследование теплообмена в двухслойной системе с фазовыми переходами является одной из актуальных проблем, например, для развития технологий изготовления тепловых труб, также это представляется фундаментальной задачей с точки зрения постановки граничных условий и изучения влияния газовой фазы на поверхностные

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (идентификатор проекта RFMEFI61614X0016).

явления и конвективные течения. Существование скачков температуры и давления на границе раздела (в Кнудсеновском слое) при фазовом переходе давно известно в кинетической теории, поскольку фазовые переходы происходят в условиях неравновесности [3, 4]. Недавно в работе [5] был предложен подход к описанию тепломассообмена в двухфазной системе, основанный на использовании уравнений Навье–Стокса с условиями скачков температуры и давления. Проведенный анализ показал соответствие полученных решений профилям температур и давлений, основанных на уравнениях Больцмана. Однако экспериментальные данные, касающиеся разницы в давлениях и температурах (скачков) на границах раздела сред, остаются немногочисленными.

В работе [6] представлен один из первых экспериментов по измерению профиля температуры в системе жидкость–пар при испарении жидкости в закрытой системе, в нем использовалось несколько термопар с диаметром королька 0,3 мм, расположенных последовательно на определенном расстоянии друг от друга. В работе [7] были изложены результаты измерения профиля температуры с помощью микротермопары с диаметром проводов 25,4 мкм. В этих работах были измерены скачки температуры на границе раздела жидкость–пар в условиях насыщения при пониженном давлении. В работе [8] измерения выполнялись термопарой диаметром 50 мкм при наличии продольного градиента температуры на поверхности жидкости (жидкость нагревается с боковой части кюветы). Дальнейшее экспериментальное изучение межфазной области с целью получения распределения температур на границе раздела сред необходимо для сравнения измеренных величин температурных скачков с результатами, предсказанными кинетической теорией. Это направление является крайне важным для интенсификации процессов теплообмена в микросистемах.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию температурного профиля в двухслойной системе жидкость–газ поперек слоев при нагреве жидкости со стороны подложки с целью отработки методики проведения экспериментов по изучению скачков температуры в межфазной области.

Эксперименты проводились на установке, схема которой показана на рис. 1. Установка включает: рабочий участок, шприцевой насос, источник питания, микротермопары, прецизионную подвижку, контрольно-измерительную систему, персональный компьютер, видеокамеру, оптическую систему для теневого метода. Компоненты установки располагались на оптическом столе и находились внутри прозрачного кожуха для предотвращения попадания пыли и воздействия возмущений воздуха. Для исследования теплообмена в двухслойной системе жидкость–газ использовался рабочий участок, основой которого являлись фторопластовое основание и нагревательный элемент. Основание, в котором расположен вырез для жидкости диаметром 35 мм и высотой 1 мм, имело круглую форму. В центре основания располагалось круглое отверстие диаметром 1,6 мм. Нагревательный элемент представлял собой латунный сердечник с круглой головкой диаметром 1,6 мм. Кончик сердечника плотно вставляется в отверстие фторопластового основания и выравнивается с ним в одну плоскость. Источником тепла является нихромовая лента, намотанная на хвостовик сердечника. Для минимизации теплопотерь нагревательный элемент тщательно теплоизолировался стеклотканью, которая в несколько слоев обматывалась вокруг сердечника нагревательного элемента. Для измерения и контроля температуры в нагревательный элемент были вмонтированы три стандартные микротермопары фирмы Omega (1, 2, 3 на рис. 1). Термопара 1 располагалась на поверхности нагревателя, контактирующей с жидкостью. Термопары 2 и 3 были установлены в массивной части сердечника под нихромовой лентой. Измеренные с помощью термопар 1, 2, 3, установленных в разных местах нагревательного элемента, величины температур отличались не больше 1 °С в диапазоне температур от 20 до 92 °С. На рис. 2а, 2б приведены данные этих термопар при различных режимах нагрева. По оси ординат отложена температура, по оси абсцисс — время. Видно, что с достаточной точностью можно считать температуру в нагревателе однородной. Измерения температуры для каждого режима эксперимента проводились не менее трех раз. Мощность нагревательного элемента контролировалась посредством источника питания. Плотность теплового

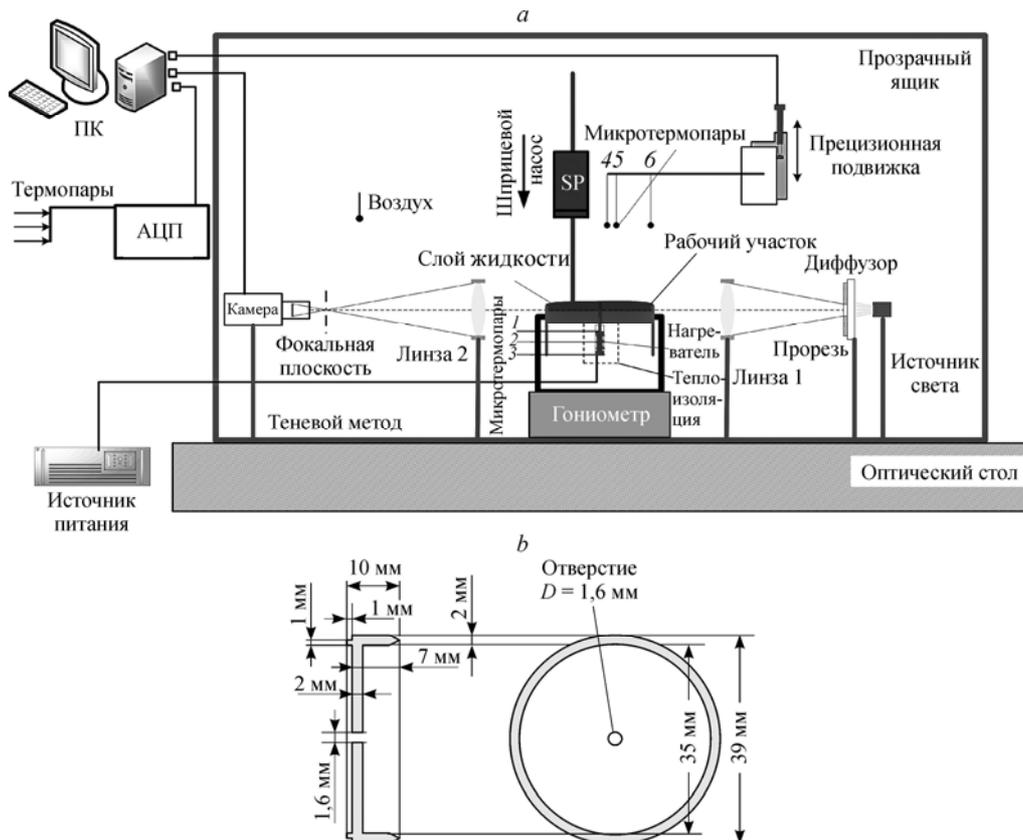


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и чертеж экспериментального участка (б).

потока q_w определялась двумя способами: по мощности джоулева тепла, выделяемого нихромовой лентой, как $q_w = UI/S$, где U — напряжение, I — сила тока, S — площадь сечения наконечника нагревателя, а также по разности температур между показаниями термопар 2 и 3, установленных вдоль цилиндрической части нагревателя. По оценке авторов отличие между плотностями теплового потока растет с увеличением нагрева и составляет не более 15 % для рассмотренных режимов нагрева. Температуры нагревателя, жидкости и окружающей среды измеряются с помощью микротермопар. Сбор данных по температурам осуществляется с помощью контрольно-измерительной системы, состоящей из системы сбора данных (АЦП) и программного обеспечения.

Эксперименты по измерению профиля температуры поперек слоев в системе жидкость–газ проводились с помощью стандартных откалиброванных микротермопар типа К (Omega) с размером королька 150 мкм. Показания термопар были проверены с помощью двух эталонных термометров сопротивления ЭТС-100, погрешность которых для исследуемых диапазонов температур составляет 0,05 °С. Калибровка проводилась с помощью калибратора КС-100-1. Калибровочная кривая аппроксимировалась с помощью полинома четвертой степени. Точность изменения температур составила 0,1 °С. Также были выполнены оценки погрешности измерений как по формулам работы [9], так и на основе решения задачи переноса тепла в тонком стержне, находящемся в атмосфере/жидкости с линейным распределением температуры. Причем, были поставлены граничные условия 3-го рода на боковых стенках провода и на некотором расстоянии от королька вверх по потоку. Коэффициент теплоотдачи при этом вычислялся по формулам, приведенным в [9], и составил 120 Вт/(м²К). Получено, что для микротермопары с диаметром провода 100 мкм и перепада температур 5 К на расстоянии 2 мм разность температур термопары и атмосферы (погрешность измерений) для рассмотренных

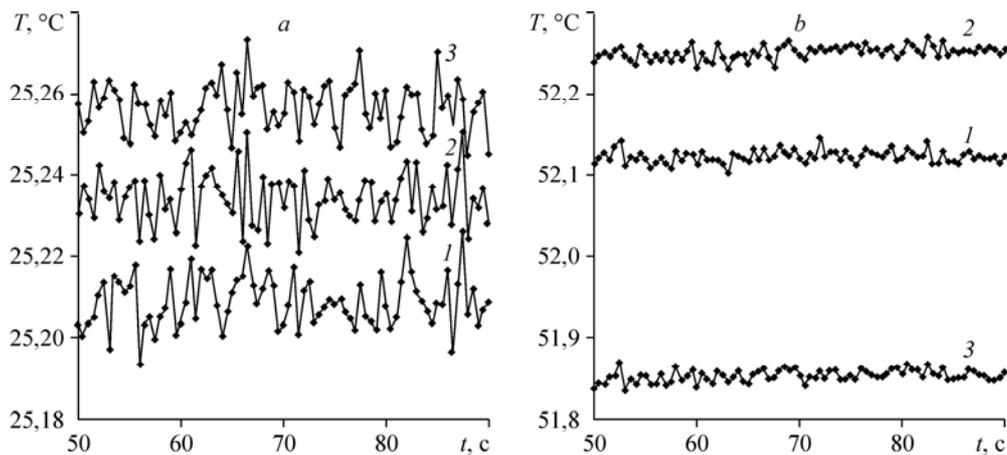


Рис. 2. Показания термопар 1, 2, 3, установленных в нагревательный элемент без нагрева (а), и с мощностью нагрева 0,35 Вт с плотностью теплового потока $q_w = 17,5 \text{ Вт/см}^2$ (б).

режимов составила менее 1 % от измеренных данных. Отметим также работу [10], где применялась термопара с размером горячего спая 5–10 мкм для измерения температуры в турбулентном потоке воды в неизотермических условиях и были проведены оценки погрешности измерений. В качестве рабочей жидкости использовалась специально подготовленная очищенная деионизованная вода Ultrapur Water (Merck Millipore) без содержания солей. С помощью шприцевого насоса вода подавалась в рабочий участок, где формировался горизонтальный слой жидкости. Толщина слоя варьировалась в зависимости от режимных параметров эксперимента и составляла не более 2 мм. Горизонтальный слой оставался открытым в атмосферу внутри прозрачного негерметичного кожуха с основанием $80 \times 50 \text{ см}^2$ и высотой 35 см, так что давление внутри кожуха было атмосферное.

По центру подложки рабочего участка осуществлялся постоянный локальный нагрев, за счет чего образовывался поток паров воды с центральной части поверхности слоя жидкости. Исследовалось несколько стационарных режимов в диапазоне температур нагревателя от 20 до 92 °С. Три микротермопары использовались для измерения температуры поперек слоёв жидкости и воздуха. Расстояние между микротермопарами 4 и 5 составляло около 5 мм, между 5 и 6 — около 12,5 мм, таким образом микротермопара 4 была расположена над нагреваемым центром осесимметричного рабочего участка (рис. 1). Положение микротермопар определялось посредством прецизионной подвижки Zaber, подключенной к персональному компьютеру и управляемой с помощью специального программного обеспечения. Диапазон передвижения микротермопары равнялся 50 мм с шагом 1 мкм. Скорость передвижения микротермопар в экспериментах составляла 100 мкм/с. Наблюдение за формой поверхности и уровнем слоя жидкости, положением и движением микротермопары над и поперек горизонтального слоя жидкости осуществлялось теневым методом с помощью видеокамеры с разрешением 640×480 пикселей.

На рис. 3 представлены данные измерения профиля температуры газовой фазы и слоя жидкости при температуре

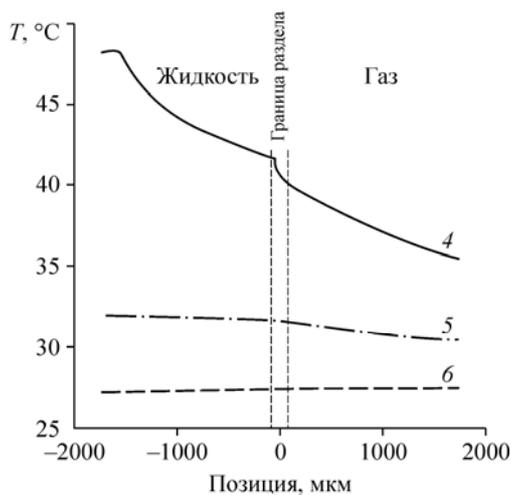


Рис. 3. Профили температур поперек слоев газа и жидкости, полученных с помощью термопар 4, 5, 6. Температура нагревателя 52 °С.

нагревателя $52\text{ }^{\circ}\text{C}$. По оси абсцисс отмечено положение микротермопары. Поскольку размер чувствительного элемента микротермопары составляет $150\text{ }\mu\text{m}$, то положение при $-75\text{ }\mu\text{m}$ соответствует точке касания микротермопарой поверхности жидкости, отметка 0 соответствует моменту, когда середина чувствительного элемента микротермопары находится на границе раздела, $75\text{ }\mu\text{m}$ соответствует моменту, когда конец королька микротермопары находится на границе раздела. Толщина слоя жидкости контролировалась с помощью теневого метода, а также посредством подвижки с микротермопарой и специального программного обеспечения, которое фиксировало точки позиции в заданный момент. Сначала определялась начальная высота, затем по первому касанию микротермопарой поверхности жидкости идентифицировалась точка новой границы раздела для следующих итераций в ходе эксперимента. Микротермопары 4, 5, 6 двигались со стороны газовой фазы к жидкости, сначала измерялась температура в газовой фазе, затем в жидкости, в конце термомпара 4 достигала нагревателя, измеряя при этом среднее значение между температурой нагревателя и температурой слоя жидкости на расстоянии головки термомпары, а термомпары 5, 6 измеряли температуру нижней стенки рабочего участка. Заметим, что температура вблизи нагревателя, измеренная со стороны жидкости, имеет значение на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже по сравнению с показаниями термомпар в нагревательном элементе (рис. 2b). Во всем диапазоне температур нагревателя от 20 до $92\text{ }^{\circ}\text{C}$ прослеживалась хорошая локальность нагрева по всей толщине слоев жидкости и газа, как показано на рис. 3. В слое жидкости температура по центру была всегда

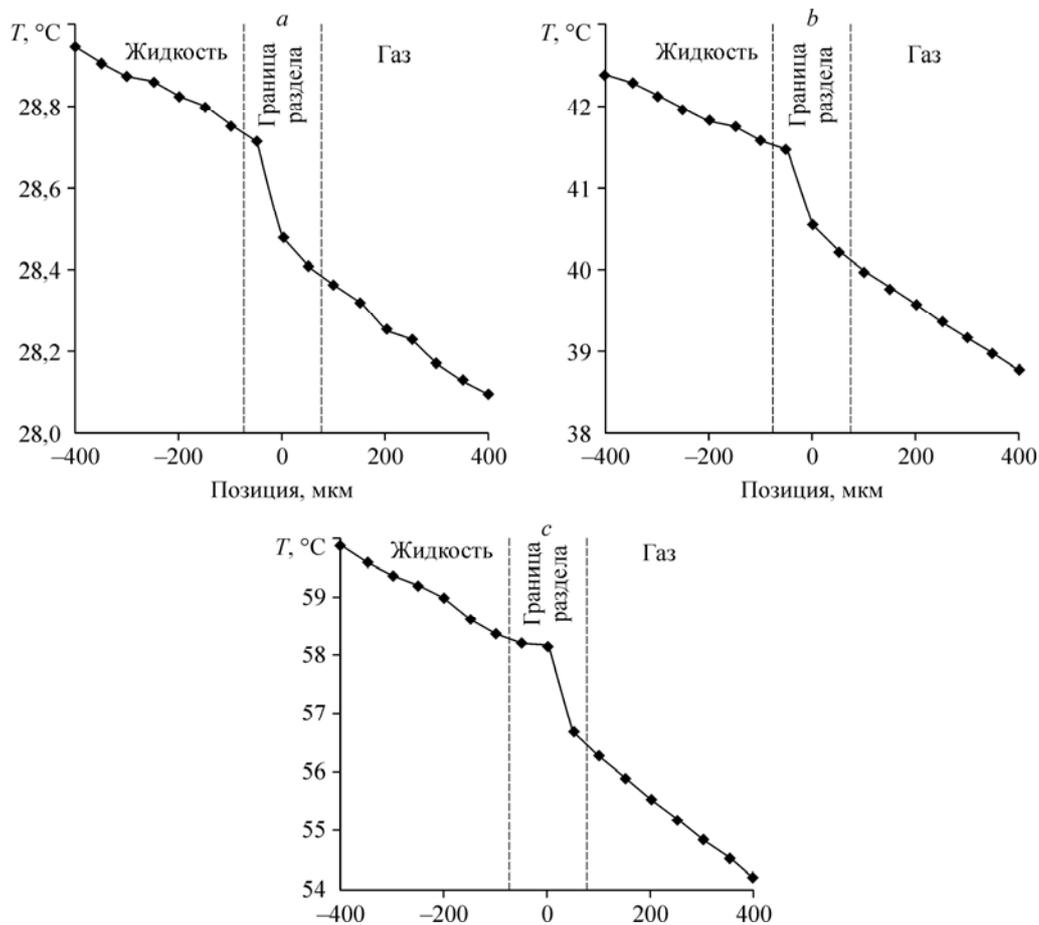


Рис. 4. Профиль температуры поперек слоев газ–жидкость вблизи границы раздела (показания микротермопары 4).

Толщина слоя жидкости $1750\text{ }\mu\text{m}$, температура нагревателя: 31 (a), 52 (b), 92 (c) $^{\circ}\text{C}$.

намного выше. Также во всем диапазоне температур нагревателя от 20 до 92 °С наблюдался излом профиля температуры на границе раздела жидкость–газ, который скорее всего связан с различной теплопроводностью жидкости и газа.

На рис. 4а–4с приведены данные измерения температур вблизи межфазной границы для различных температур нагревателя. Видно, что существует характерный перепад температуры (скачок) на границе раздела жидкость–газ. Величина скачка растет с увеличением температуры нагревателя и соответственно с увеличением интенсивности испарения. Измерения проводились несколько раз и данные устойчиво повторялись. Скорость испарения определялась как $u = (q_l - q_g)/r\rho_v$, где q_l — тепловой поток на границе раздела со стороны жидкости, q_g — тепловой поток на границе раздела со стороны газа (обе характеристики определялись по разности температур из экспериментальных данных), r — удельная теплота испарения, ρ_v — плотность пара. При температуре нагревателя 92 °С осредненная величина скачка составила около 1,3 °С, а скорость испарения — около 20 мм/с.

Прецизионная подвижка с малым шагом (1 мкм) позволяет получить подробные данные на межфазной границе. Таким образом отработана методика измерения температурного поля на межфазной границе. Обратим внимание, что толщина межфазной границы имеет порядок нескольких длин свободного пробега молекулы при заданных условиях (давлении, температуре). При нормальных условиях (атмосферное давление), в которых проводился эксперимент, эта величина составляет порядка 1 мкм для паров воды. Полученные результаты нуждаются в дальнейшем анализе с более точной измерительной системой (малый размер микротермопары) или в условиях пониженного давления.

В заключение отметим, что одним из главных достижений настоящей работы является разработка методики измерения профиля температуры на межфазной границе с помощью прецизионной подвижки с шагом 1 мкм и микротермопары в условиях интенсивного испарения. С помощью разработанной методики установлено существование скачка температуры на межфазной границе, значение которого растет с увеличением температуры. Получена подробная картина температурного поля в области межфазной границы с помощью прецизионной подвижки с малым шагом.

Список литературы

1. Bar-Cohen A., Wang P. Thermal management of on-chip hot spot // J. Heat Transfer. 2012. Vol. 134, No. 5. P. 051017-1–051017-11.
2. Kandlikar S.G., Colin S., Peles Y., Garimella S., Pease R.F., Brandner J.J., Tuckerman D.B. Heat transfer in microchannels — 2012 status and research needs // J. Heat Transfer. 2013. Vol. 135, No. 9. P. 091001-1–091001-18.
3. Кучеров Р.Я., Рикенглаз Л.Э. О гидродинамических граничных условиях при испарении и конденсации // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1959. Т. 37, Вып. 1, № 7. С. 125–126.
4. Pao Y.-P. Temperature and density jumps in the kinetic theory of gases and vapors // Phys. Fluids. 1971. Vol. 14, No. 7. P. 1340–1346.
5. Gatapova E.Ya., Graur I.A., Sharipov F., Kabov O.A. The temperature and pressure jumps at the vapor-liquid interface: Application to a two-phase cooling system // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. Vol. 83. P. 235–243.
6. Shankar P.N., Deshpande M.D. On the temperature distribution in liquid–vapor phase change between plane liquid surfaces // Phys. Fluids A. 1990. Vol. 2, No. 6. P. 1030–1038.
7. Ward C.A., Stanga D. Interfacial conditions during evaporation or condensation of water // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 64. P. 051509-1–051509-9.
8. Zhu Z.-Q., Liu Q.-S. Interfacial temperature discontinuities in a thin liquid layer during evaporation // Microgravity Sci. Technol. 2013. Vol. 25. P. 243–249.
9. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры // Ленинград. Энергоатомиздат. 1990.
10. Хабахпашева Е.М., Перепелица Б.В., Пшеничников Ю.М., Насибулов А.М. Влияние скорости течения на нестационарный теплообмен при резком изменении теплового потока // Структура гидродинамических потоков (вынужденное течение, тепловая конвекция). Новосибирск, ИТФ СО АН СССР, 1986. С. 25 – 39.

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2014 г.,
после доработки — 5 декабря 2014 г.