

УДК 536.5:536.24

## ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР ВБЛИЗИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ ЖИДКОСТЬ–ГАЗ ПРИ ИСПАРЕНИИ ВОДЫ И ЭТАНОЛА В ВОЗДУХ<sup>1</sup>

© 2023 г. Е. Я. Гатапова<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

\*E-mail: gatapova@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 09.12.2022 г.

После доработки 09.03.2023 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

Работа посвящена экспериментальному исследованию температурного поля двухслойной системы жидкость–газ при нормальном атмосферном давлении для осесимметричной конфигурации. Измерения температур проведены для тонкого слоя воды и этанола толщиной около 2 мм при локальном нагреве и испарении в воздух с использованием микротермопары с плоским корольком толщиной около 3 мкм, двигающейся поперек слоев с шагом 48 нм. Фторопластовая кювета с жидкостью диаметром 35 мм и с нагревателем (диаметр — 1.6 мм) в центре располагалась внутри бокса размером  $800 \times 500 \times 350$  мм<sup>3</sup>, так что испарение происходило в воздух с контролируемой температурой и влажностью. Получена эволюция профиля температуры вблизи межфазной границы жидкость–воздух при увеличении температуры нагревателя до 88°C. В зависимости от условий окружающей среды и типа жидкости температура в газовой фазе вблизи межфазной границы может быть выше или ниже, чем температура жидкости. Показано, что для летучей жидкости (этанола) профиль температуры совершенно другой, чем для нелетучей жидкости. А именно, температура в газовой фазе вблизи границы раздела жидкость–газ выше, чем в жидкости на границе раздела во всем рассмотренном диапазоне температур, что объясняется конвективным течением в этаноле.

DOI: 10.31857/S0040364423040051

### ВВЕДЕНИЕ

Двухфазные системы с фазовым переходом заслуживают особого внимания при проектировании систем охлаждения из-за больших коэффициентов теплоотдачи [1]. Скрытая теплота парообразования при двухфазном течении обычно обеспечивает гораздо бóльшую 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 переноса тепла в двухфазных системах актуально, например, для развития технологии изготовления тепловых труб [2], изучения процесса кипения и формирования сухих пятен [3, 4]. Важным в данной области является понимание механизмов тепло- и массообмена на границе раздела жидкость–пар в ограниченных

областях. В литературе эта тема встречается редко. Конвекция в слое жидкости напрямую влияет на испарение с межфазной поверхности и может оказывать определяющее влияние на интенсивность испарения. Для определения степени интенсификации теплообмена при испарении нужно иметь четкое представление о макроскопическом профиле температуры вблизи межфазной поверхности при изменении теплового потока. Такие данные полезны при определении степени неравновесности на границе раздела.

Один из первых экспериментов по измерению скачка температуры на границе раздела жидкость–пар в закрытой системе выполнен в работе [5]. В эксперименте использовались микротермопары с размером королька около 0.3 мм, которые были зафиксированы в камере на определенном расстоянии друг от друга. Измерения проводились для воды, фреона-113 и ртути. Авторам не удалось зафиксировать скачки температуры на границе раздела жидкость–пар для воды. Серия экспериментов, проведенная группой профессора Варда [6, 7], посвящена исследованию скачка температуры на межфазной границе для системы жидкость–пар с использованием микротермопа-

<sup>1</sup> По материалам Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8). Москва. 17–22 октября 2022 г.

ры типа К с диаметром проводов 25.4 мкм и размером королька 50 мкм. Эксперименты проведены в условиях пониженного по сравнению с атмосферным давлением. Максимальная измеренная скорость испарения была 0.044 мкл/с, поток масс через границу раздела — 0.5386 г/(м<sup>2</sup> с). Установлено, что температура пара всегда выше, чем температура жидкости на границе раздела. Максимальный скачок температуры составлял 7.8°C, на границе температура со стороны жидкости равна —14.5°C и —6.7°C со стороны пара при давлении 194.7 Па. Впоследствии показано, что основной вклад в такие значительные отклонения от кинетической теории вносит конвективное течение в паре и жидкости [8]. Неравновесные явления, такие как скачки температур и давления на межфазной границе жидкость—пар должны быть исследованы посредством высокоточных экспериментов на микроуровне [9], а также посредством точных расчетов на основе кинетических уравнений Больцмана [10–13]. В работе [9] впервые с помощью микротермопары с размером королька 4 мкм показано, что температура в газовой фазе может быть ниже температуры в жидкости на межфазной границе.

Представленный краткий обзор литературы показывает, что явления, возникающие на границе раздела двух сред, по-прежнему до конца не изучены. Во многих экспериментальных работах исследования проводились при пониженном по сравнению с атмосферным давлением. Поэтому для того, чтобы внести ясность в процессы, возникающие на границе раздела жидкость—газ, требуются дополнительные экспериментальные данные, полученные при различных условиях с использованием прецизионных измерительных приборов.

Целью данной работы является экспериментальное исследование температурного профиля в двухслойной системе вода—воздух и этанол—воздух поперек слоев при локальном нагреве жидкости со стороны подложки в условиях нормального атмосферного давления с использованием микротермопары с размером королька около 3 мкм. Поскольку в данных экспериментах оцененная толщина слоя Кнудсена мала по сравнению с толщиной королька термопары, то здесь рассматриваются только характерные профили температуры при испарении.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования тепломассообмена на границе раздела жидкость—газ использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. Установка включает в себя рабочий участок, шприцевой насос, источник питания, микротермопары, прецизионную подвижку, контрольно-измерительную систему, электронный

ноль, термогигрометр, барометр, персональный компьютер, видеокамеру, оптическую систему для теневого метода. Микротермопары №№ 1–3 расположены в нагревателе, №№ 4–6 закреплены на микроподвижке. Компоненты установки располагались на оптическом столе и находились внутри прозрачного кожуха размером 800 × 500 × 350 мм<sup>3</sup> для предотвращения попадания пыли и воздействия возмущений воздуха. Рабочий участок представляет собой круглую кювету, которая изготовлена из политетрафторэтилена и имеет вырез для жидкости диаметром 35 мм и высотой 1 мм. Кювета установлена горизонтально при помощи гониометра. Граница раздела жидкость—газ расположена на высоте около 150 мм от оптического стола. В центре кюветы имеется круглое отверстие диаметром 1.6 мм, куда впрессован латунный нагреватель. В качестве нагревателя использовался сердечник из латуни с диаметром головки 1.6 мм. Нагреватель плотно вставляется в отверстие кюветы, так что кювета и нагреватель создают единую плоскость.

Через намотанную поверх нижней части сердечника нихромовую ленту проходит электрический ток, осуществляя тем самым нагрев. Нихромовая лента подключена при помощи двух медных проводов к источнику питания постоянного тока (Акип, 1138-2). Для минимизации тепловых потерь нижняя часть нагревательного элемента изолирована при помощи нескольких слоев стеклоткани. Температура нагревательного элемента контролируется тремя микротермопарами, которые расположены вдоль нагревателя. Две из них находятся в массивной части нагревателя под нихромовой лентой симметрично относительно середины нагревателя. Третья микротермопара закреплена у основания головки нагревателя. Температура, измеренная тремя микротермопарами, установленными в разных частях нагревателя, отличается менее чем на пять градусов для всех режимов нагревателя. Рис. 2а показывает, что разница между показаниями трех термопар на нагревателе составила менее 0.08°C при отсутствии нагрева. В отличие от [9, 13] в

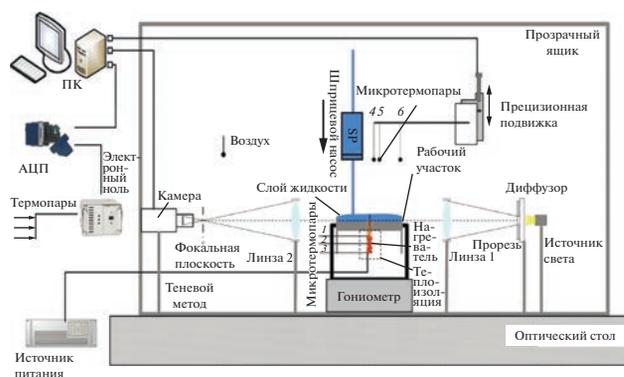
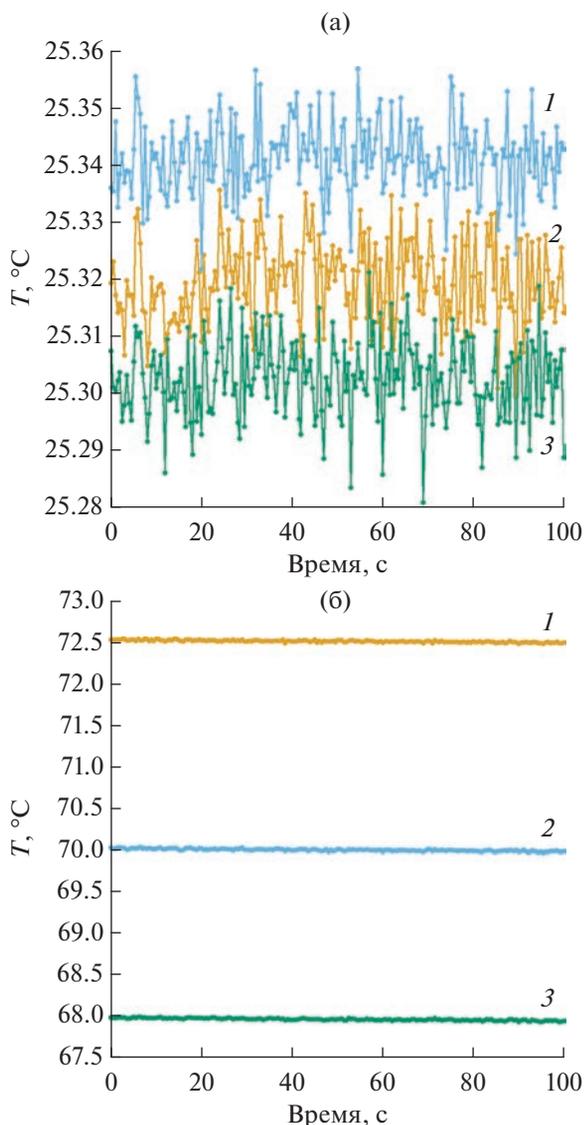


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и используемого оборудования.



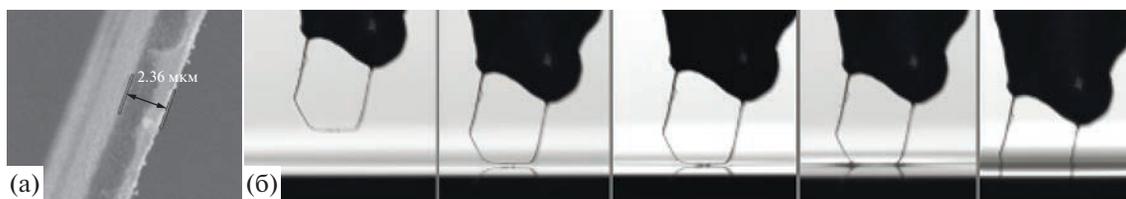
**Рис. 2.** Температура нагревателя в зависимости от времени в отсутствие жидкости в кювете: (а) без нагрева, (б) мощность нагревателя – 540 мВт; 1–3 – показания термодатчиков 1–3 соответственно.

данной работе использовались микротермопара L-типа, электронный ноль, а также выполнена прецизионная синхронизация с помощью софта и автоматизирован процесс определения межфазной границы [14].

При помощи шприцевого насоса (Cole-Parmer, 110) в кювете формируется горизонтальный слой жидкости. Толщина слоя жидкости варьируется для различных режимов нагревателя и составляет около 2 мм. В качестве рабочей жидкости используются ультрачистая деионизированная вода (Merck Millipore Milli-Q) и 99%-ный раствор этанола. Слой жидкости снизу подогревается расположенным в центре точечным нагревателем и свободно испаряется в окружающий газ внутри короба.

Термопары типа К (Omega) с размером королька 75 мкм (№№ 5, 6), используемые для измерения температуры в газе над границей раздела, а также основная микротермопара типа L с поперечным размером плоского королька около 3 мкм (№ 4, рис. 3) прикреплены к микроподвижке (Zaber T-LSM 025A) на удалении около 300 мм при помощи держателя из текстолита. Микроподвижка перемещает микротермопары вверх–вниз и определяет позицию. Диапазон движения микроподвижки – 25.4 мм с величиной минимального шага 47.625 нм. Свободные концы всех микротермопар припаяны к медным проводам и опущены в электронный термостат (Fluke, 9101), который поддерживает температуру равной нулю с погрешностью 0.001°C. Сигнал с микротермопар поступает в терминал сбора данных (National instruments, 9214), который, как и микроподвижка, подключен к компьютеру. Данные с микроподвижки и терминала сбора данных обрабатываются в режиме реального времени при помощи специально разработанного собственного программного обеспечения. Для наблюдения за положением микротермопары используется теневой метод. Разрешение используемой камеры составляет 2592 × 1944. Оптическая система включает в себя дополнительную увеличивающую линзу, что позволяет получить изображение 1 мкм/пиксель.

Основная микротермопара (рис. 3) изготовлена таким образом, чтобы избежать существенного притока тепла к корольку с других слоев за счет теплопроводности вдоль проводов. Горизонтальная часть микротермопары располагается параллельно межфазной границе, т.е. вдоль предполагаемой линии изотермы. Длина проводов, расположенных параллельно границе раздела, приблизительно равняется 20 размерам королька микротермопары с каждой стороны. Оценка ошибки измерения



**Рис. 3.** СЭМ-фотография основной микротермопары типа L, сделанная при помощи микроскопа Hitachi S340 (а), и фотографии, полученные теневым методом во время прохождения микротермопарой границы раздела двух сред (б).

за счет теплопроводности вдоль проводов проведена в работах [15–17] и не вносит существенного вклада в погрешность (около 1%). Влажность и температура воздуха в коробе измеряются при помощи Testo 645 с точностью 2% и 0.1°C соответственно. Измерительный прибор расположен на одном уровне с кюветой на удалении 30 мм. Давление измеряется при помощи барометра М-67 с точностью 106 Па.

Микротермопары типа К с размером королька 150 мкм, установленные в нагревателе (№№ 1–3), а также микротермопары типа К с размером королька 75 мкм, расположенные в воздухе над границей раздела жидкость–газ (№№ 5, 6), откалиброваны в диапазоне температур от 5 до 95°C с шагом 5°C. Уникальная микротермопара типа L (№ 4) оттарирована в диапазоне температур от 18 до 72°C с шагом 3°C. Измерения проводились с использованием калибратора (Эталон, КС 100\1). Контроль температуры осуществлялся при помощи двух эталонных термометров сопротивления (Эталон, ЭТС 100\1) и прецизионного измерителя (Эталон, В7-99). Точность измерений в исследуемом диапазоне температур 5–95°C для эталонных термометров сопротивления составляет 0.02°C при доверительной вероятности 0.95. Дискретные калибровочные данные приближались полиномом шестой степени. Точность терминала сбора данных (National instruments, 9214) в исследуемом диапазоне температур – 0.01°C. Точность термостата (Fluke, 9101), в котором расположены холодные концы микротермопар, равна 0.001°C. Таким образом, общая точность измерения температуры составила 0.0301°C.

Точность определения положения микроподвижки при перемещении на длину около 8 мкм в режиме постоянной скорости – менее 1 мкм.

Температурное поле в окрестности границы раздела жидкость–газ измеряется для различных режимов нагревателя. Измерения проводятся для стационарного режима нагрева. В каждом режиме нагревателя проводилось минимум по пять измерений с различной постоянной скоростью перемещения микротермопары. Измерения около границы раздела жидкость–газ проводились при помощи основной микротермопары типа L с размером королька около 3 мкм, которая откалибрована и подготовлена, как описано ранее. Скорость перемещения микротермопары варьировалась от 5 до 20 мкм/с. Сигнал с микротермопар считывался каждые 0.5 с. Величина разницы (скачка) температур на межфазной поверхности жидкость–газ для различных скоростей была примерно одинаковой и хорошо повторялась. Эксперименты проводились при увеличении мощности нагревателя до формирования видимого конденсата на микротермопаре.

Эксперимент проходил следующим образом: микротермопара перемещалась в положение над

жидкостью, после чего с постоянной заранее заданной скоростью проходила через слой газа, границу раздела и слой жидкости, не доходя до нагревателя. На рис. 3 изображен момент касания микротермопары границы раздела двух сред. Наблюдается мениск в области королька. Таким образом, в проведенных экспериментах корольки микротермопары всегда касался границы раздела первым.

Эксперимент управлялся при помощи специально разработанной программы. Программа для решения задач синхронизации данных с микротермопары и микроподвижки, проведения серии экспериментов в одинаковых режимах, автоматического вычисления характерных значений эксперимента, исключения человеческого фактора написана на языке C++. Она записывает время и положение для микроподвижки, а также время и значения температуры для терминала сбора данных микротермопар. После чего сравнивает и соотносит эти данные по времени. Координата границы раздела определяется двумя способами: первый – визуальный, в момент касания микротермопары о жидкость, при помощи теневого метода, второй – определение за счет скачка температуры, проявляющегося при проходе микротермопары через границу раздела [14]. В результате выполнения программы получается график зависимости температуры от координаты относительно границы раздела и задержки в синхронизации данных (рис. 4). Графики получены при следующих условиях: температура окружающего воздуха – 29.8°C, влажность – 27.1%, давление – 99.591 кПа, режим нагревателя – 21 мВт. Скорость перемещения микротермопары – 5 мкм/с.

Также программа собирает, сохраняет и обрабатывает данные с остальных микротермопар, расположенных в различных частях экспериментальной установки. Ошибка синхронизации вычисляется как модуль разности между временем получения сигнала с микротермопары и сигналом с микроподвижки. На рис. 4а указано время задержки, не превышающее 35 мс, что является достаточным для данного эксперимента, поскольку размер королька микротермопары на порядок больше расстояния, пройденного микротермопарой за это время. Для всех представленных экспериментов скорость задержки синхронизации не превышает 50 мс. Положение дна в координатах микроподвижки определяется один раз для всех экспериментов. Это позволяет автоматически вычислять толщину слоя жидкости как место скачка температуры при прохождении через границу раздела. Для режима, представленного на рис. 4б, величина максимального скачка температуры равна около 0.045°C. Максимальный скачок температуры наблюдался около 98-й секунды эксперимента. Позиция максимального скачка в координатах микроподвижки – 15153.5 мкм, позиция дна в координатах микроподвижки – 17327 мкм. Таким образом, толщина слоя жидкости – 2173.5 мкм.

Проводя серию экспериментов и измеряя толщину слоя жидкости при помощи автоматического и визуального метода, можно наблюдать за

изменением толщины пленки жидкости и определять скорость испарения жидкости по следующей формуле:

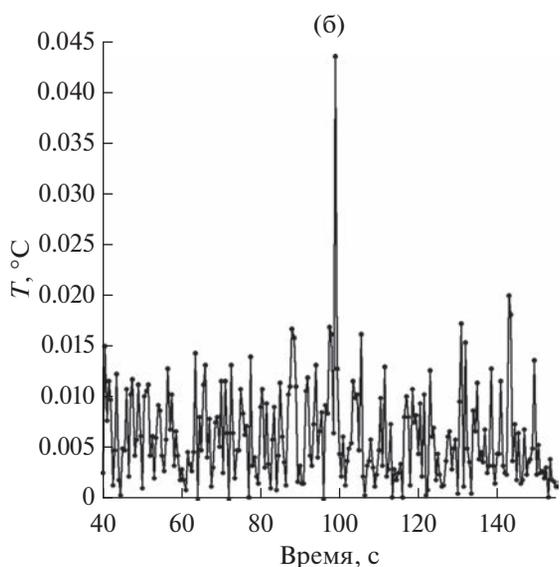
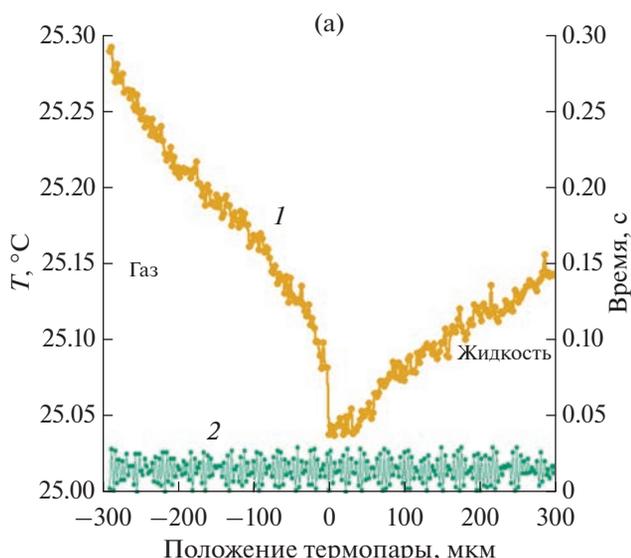
$$\text{скорость испарения} = \frac{\text{разница толщин слоя жидкости}}{\text{время}} \times \text{площадь кюветы.}$$

Стоит отметить, что такой способ может иметь большую ошибку (около 10%), так как в нем не учитываются особенности профиля пленки жидкости и такие эффекты, как термокапиллярная деформация поверхности пленки.

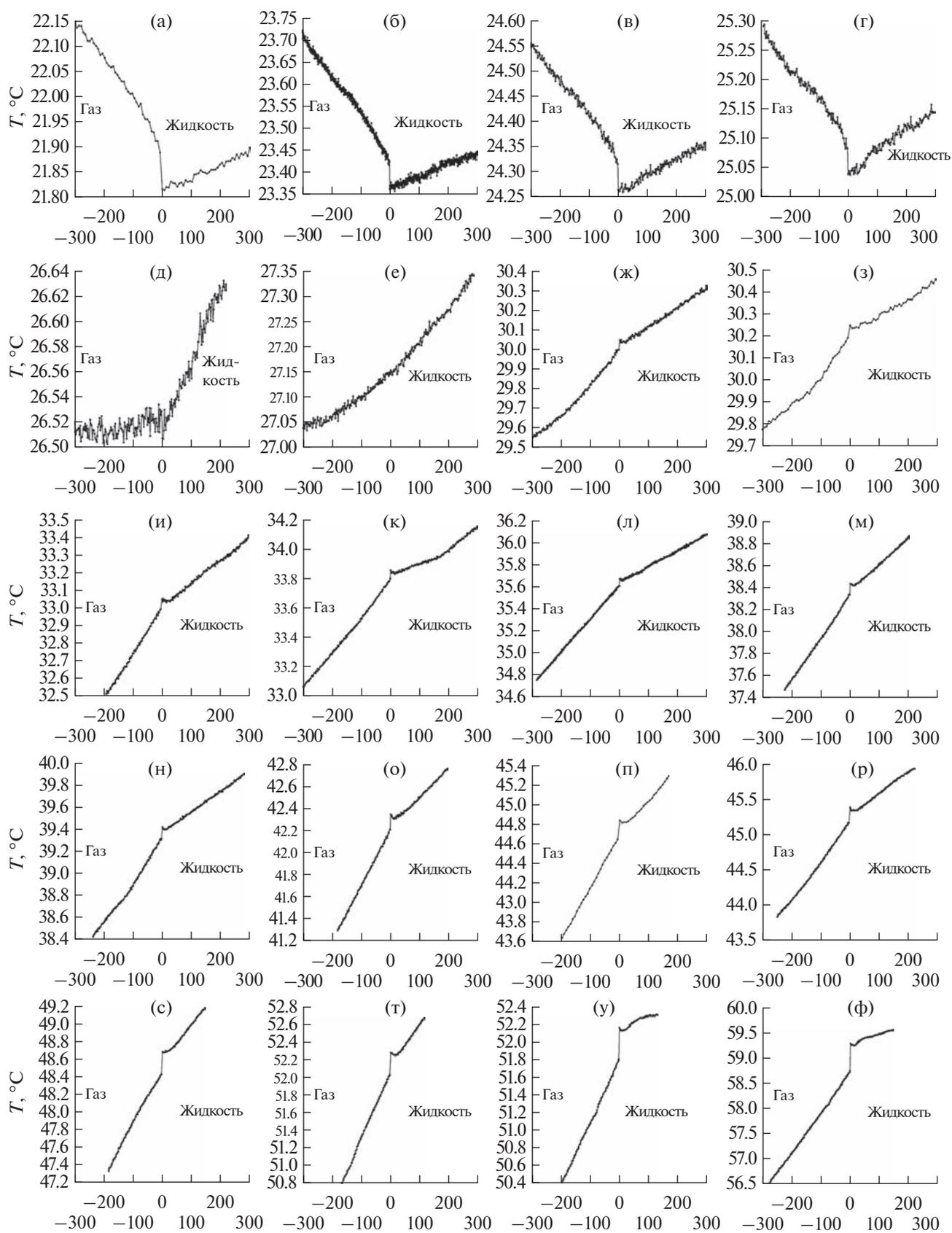
### РЕЗУЛЬТАТЫ

**Система вода–воздух.** На рис. 5 представлены данные измерения температурного профиля на границе раздела вода–воздух поперек слоев при локальном нагреве жидкости снизу. Позиция 0 соответствует границе раздела жидкость–газ, положительные значения координаты – положение в жидкости, отрицательные – в газе. Для определения профилей температуры проведена серия из более чем ста экспериментов. Так как данные для каждого эксперимента уникальны (температура на границе всегда разная, как и толщина слоя жидкости), они представлены для конкретных экспериментов, а не в осредненном виде. Однако величина разницы температур на межфазной поверхности вода–воздух для стационарного режима нагревателя примерно в разных экспериментах одинаковая и хорошо повторялась. Подробные данные по каждому режиму нагревателя, в том числе по величине разности температур на межфазной границе, скорости испарения и температуры в разных частях экспериментальной установки, представлены в табл. 1.

На рис. 5а приведен профиль температуры при отсутствии нагрева. Температура воздуха на границе раздела выше, чем температура в жидкости – наблюдается скачок температуры с отрицательным значением. Стоит обратить внимание на профиль температуры в воздухе: с уменьшением координаты, увеличивается температура (рис. 5а–5г). Такое увеличение температуры может быть объяснено наличием дополнительных источников тепла в защитном боксе (камера, источник света, микроподвижка), которые расположены в разных частях установки и окружают кювету. Теплый воздух легче холодного и поэтому поднимается вверх. К тому же газовая фаза более чувствительна, чем жидкость, к любым изменениям внешних условий. Далее при увеличении мощности нагрева наблюдалось выравнивание профиля температуры в воздухе, такой режим представлен на рис. 5д. В данном режиме скачок отсутствует или не может быть обнаружен на этой установке и наблюдается классический непрерывный профиль температуры. После этого профиль температуры в воздухе меняет угол наклона на положительный и локально совпадает с углом наклона профиля температуры в жидкости (рис. 5е). Для данного режима скачок также не удалось обнаружить. Далее с ро-



**Рис. 4.** Графики выполненных измерений (а): 1 – профиль температуры, 2 – задержка измерений; (б) – абсолютное изменение температуры после каждого измерения.



Положение термопары,  $\mu\text{м}$  Положение термопары,  $\mu\text{м}$  Положение термопары,  $\mu\text{м}$  Положение термопары,  $\mu\text{м}$

Рис. 5. Профили температуры для системы вода–воздух при различных режимах нагрева, данные см. в табл. 1.

Таблица 1. Данные серии экспериментов для системы вода–воздух

| № режима нагревателя | Мощность нагревателя, мВт | Температура воздуха в коробке, °С | Влажность в атмосфере, % | Температура нагревателя, °С (термопара № 1) | Температура воздуха за 200 мкм до границы раздела, °С | Температура перед границей раздела, °С | Температура после границы раздела $T_L$ , °С | Температура жидкости после 200 мкм за границей раздела, °С | Скорость испарения, мкл/с | Давление, кПа | Профиль температуры, рис. 5 |
|----------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---|---|--|--|--|---------------------------|---------------|-----------------------------|
| 1                    | 0                         | 23.1                              | 27.1                     | 23.006                                      | 22.077  | 21.889                                 | 21.816                                       | 21.869   | 0.078                     | 99.59         | 5а                          |
| 2                    | 2                         | 23                                | 29.1                     | 24.320                                      | 23.609  | 23.423                                 | 23.369                                       | 23.427   | 0.084                     | 99.59         | 5б                          |
| 3                    | 8                         | 29.7                              | 26.8                     | 25.633                                      | 24.474  | 24.316                                 | 24.264                                       | 24.324   | 0.087                     | 99.59         | 5в                          |
| 4                    | 21                        | 29.8                              | 27.1                     | 26.814                                      | 25.214  | 25.082                                 | 25.037                                       | 25.112   | 0.066                     | 99.59         | 5г                          |
| 5                    | 44                        | 29.5                              | 26                       | 29.075                                      | 26.518  | 26.532                                 | 26.509                                       | 26.614   | 0.076                     | 99.59         | 5д                          |
| 6                    | 65                        | 29.7                              | 26.6                     | 30.021                                      | 27.061  | 27.146                                 | 27.154                                       | 27.272   | 0.071                     | 99.46         | 5е                          |
| 7                    | 96                        | 29.9                              | 27.4                     | 33.674                                      | 29.662  | 29.999                                 | 30.049                                       | 30.221   | 0.076                     | 99.46         | 5ж                          |
| 8                    | 119                       | 29.8                              | 24.2                     | 34.618                                      | 29.899  | 30.194                                 | 30.250                                       | 30.368   | 0.092                     | 99.46         | 5з                          |
| 9                    | 160                       | 30.6                              | 25.1                     | 38.603                                      | 32.517 (-191.1 мкМ)                                   | 32.997                                 | 33.054                                       | 33.275   | 0.095                     | 99.46         | 5и                          |
| 10                   | 198                       | 31                                | 26.8                     | 41.087                                      | 33.290  | 33.802                                 | 33.858                                       | 33.983   | 0.089                     | 99.46         | 5к                          |
| 11                   | 250                       | 31.3                              | 26.2                     | 44.528                                      | 35.002  | 35.607                                 | 35.672                                       | 35.929   | 0.091                     | 99.46         | 5л                          |
| 12                   | 297                       | 31.6                              | 26.6                     | 48.363                                      | 37.566  | 38.335                                 | 38.435                                       | 38.866   | 0.113                     | 99.46         | 5м                          |
| 13                   | 360                       | 31.7                              | 27.2                     | 50.798                                      | 38.564  | 39.324                                 | 39.425                                       | 39.755   | 0.126                     | 99.46         | 5н                          |
| 14                   | 416                       | 31.7                              | 27                       | 55.475                                      | 41.297 (-188.3 мкМ)                                   | 42.211                                 | 42.348                                       | 42.765 (187.6 мкМ)   | 0.126                     | 99.46         | 5о                          |
| 15                   | 490                       | 31.9                              | 27.9                     | 59.108                                      | 43.641 (-197.3 мкМ)                                   | 44.648                                 | 44.841                                       | 45.297 (168.3 мкМ)   | 0.167                     | 99.46         | 5п                          |
| 16                   | 570                       | 32                                | 28.2                     | 63.572                                      | 44.058  | 45.166                                 | 45.385                                       | 45.900   | 0.177                     | 99.46         | 5р                          |
| 17                   | 640                       | 32                                | 29.1                     | 67.919                                      | 47.332 (-184.3 мкМ)                                   | 48.437                                 | 48.686                                       | 49.182 (145.3 мкМ)   | 0.183                     | 99.46         | 5с                          |
| 18                   | 810                       | 32.1                              | 30.4                     | 76.753                                      | 50.803 (-167.1 мкМ)                                   | 52.026                                 | 52.281                                       | 52.671 (114.4 мкМ)   | 0.200                     | 99.46         | 5т                          |
| 19                   | 874                       | 32.2                              | 29.8                     | 76.633                                      | 50.406  | 51.808                                 | 52.165                                       | 52.308 (124.9 мкМ)   | 0.177                     | 99.46         | 5у                          |
| 20                   | 1071                      | 32.3                              | 30.2                     | 88.197                                      | 57.107  | 58.753                                 | 59.300                                       | 59.563 (145.1 мкМ)   | 0.215                     | 99.46         | 5ф                          |

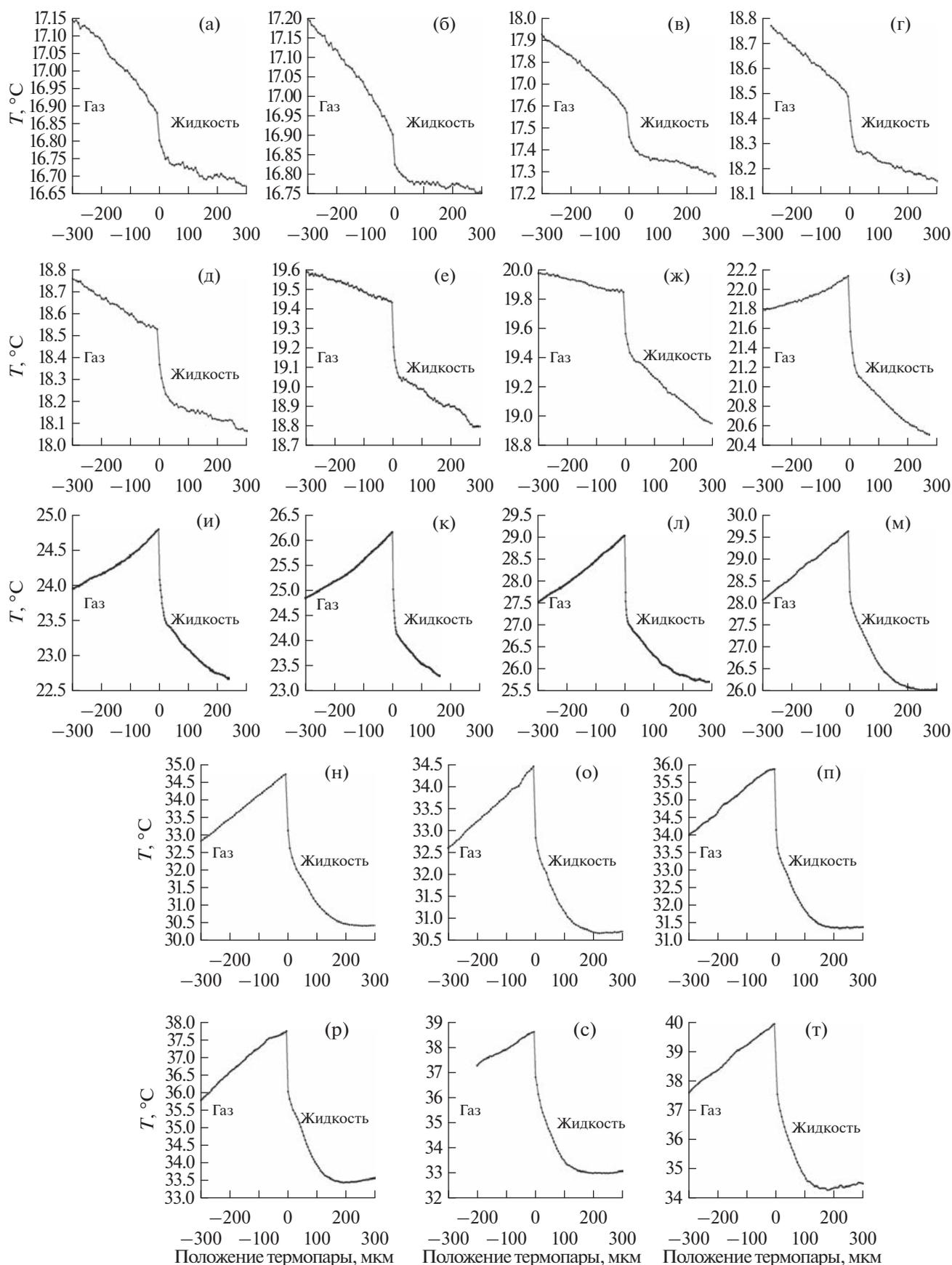


Рис. 6. Профили температуры для системы этанол–воздух при различных режимах нагрева, данные см. в табл. 2.

Таблица 2. Данные серии экспериментов для системы этанол–воздух

| № режима нагревателя | Мощность нагревателя, мВт | Температура воздуха в коробке, °С | Влажность в атмосфере, % | Температура нагревателя, °С (термомпара № 1) | Температура воздуха за 200 мкм до границы раздела, °С | Температура перед границей раздела, °С | Температура после границы раздела $T_L$ , °С | Температура жидкости после 200 мкм за границей раздела, °С | Скорость испарения, мкл/с | Давление, кПа | Профиль температуры, рис. 6 |
|----------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--|---|--|--|--|---------------------------|---------------|-----------------------------|
| 1                    | 0                         | 22.4                              | 32.4                     | 16.690                                       | 17.087  | 16.882                                 | 16.803                                       | 16.700   | 0.334                     | 99.46         | 6а                          |
| 2                    | 2                         | 23                                | 32.1                     | 16.822                                       | 17.120  | 16.905                                 | 16.828                                       | 16.777   | 0.318                     | 99.32         | 6б                          |
| 3                    | 10                        | 23.6                              | 34.1                     | 18.245                                       | 17.833  | 17.574                                 | 17.465                                       | 17.334   | 0.331                     | 99.32         | 6в                          |
| 4                    | 21                        | 24                                | 33.6                     | 19.512                                       | 18.693  | 18.490                                 | 18.392                                       | 18.192   | 0.322                     | 99.32         | 6г                          |
| 5                    | 28                        | 23.9                              | 33.9                     | 19.789                                       | 18.670  | 18.531                                 | 18.369                                       | 18.117   | 0.325                     | 99.32         | 6д                          |
| 6                    | 55                        | 24                                | 33.7                     | 21.807                                       | 19.544  | 19.435                                 | 19.207                                       | 18.903   | 0.319                     | 99.32         | 6е                          |
| 7                    | 90                        | 24                                | 34.5                     | 23.596                                       | 19.935  | 19.849                                 | 19.565                                       | 19.090   | 0.319                     | 99.32         | 6ж                          |
| 8                    | 144                       | 24                                | 34.8                     | 27.249                                       | 21.868  | 22.136                                 | 21.571                                       | 20.618   | 0.318                     | 99.32         | 6з                          |
| 9                    | 189                       | 24                                | 35                       | 31.150                                       | 24.150  | 24.796                                 | 24.076                                       | 22.750   | 0.322                     | 99.32         | 6и                          |
| 10                   | 230                       | 23.9                              | 35.8                     | 33.705                                       | 25.186  | 26.163                                 | 25.026                                       | 23.295 (158.3 мкм)   | 0.308                     | 99.32         | 6к                          |
| 11                   | 324                       | 23.9                              | 36.5                     | 39.036                                       | 27.952  | 29.030                                 | 27.747                                       | 25.844   | 0.327                     | 99.32         | 6л                          |
| 12                   | 448                       | 22.4                              | 35.2                     | 45.591                                       | 28.575  | 29.633                                 | 28.261                                       | 26.082   | 0.372                     | 99.59         | 6м                          |
| 13                   | 540                       | 23.5                              | 35.4                     | 53.593                                       | 33.479  | 34.730                                 | 33.131                                       | 30.467   | 0.396                     | 99.59         | 6н                          |
| 14                   | 592                       | 23.9                              | 36.1                     | 55.487                                       | 33.239  | 34.469                                 | 32.851                                       | 30.695   | 0.380                     | 99.59         | 6о                          |
| 15                   | 697                       | 23.9                              | 37.8                     | 62.037                                       | 34.662  | 35.879                                 | 34.165                                       | 31.386   | 0.398                     | 99.59         | 6п                          |
| 16                   | 846                       | 24                                | 39.5                     | 72.703                                       | 36.583  | 37.743                                 | 36.040                                       | 33.449   | 0.467                     | 99.59         | 6р                          |
| 17                   | 1000                      | 24                                | 41.5                     | 80.105                                       | 37.284  | 38.617                                 | 36.811                                       | 33.014   | 0.477                     | 99.59         | 6с                          |
| 18                   | 1113                      | 24                                | 42.5                     | 84.776                                       | 38.367  | 39.940                                 | 37.552                                       | 34.386   | 0.513                     | 99.59         | 6т                          |

стом мощности нагревателя скачок меняет свой знак и увеличивается.

Для представленных режимов нагревателя, за исключением двух режимов (№№ 5, 6), всегда существовал характерный перепад температуры на границе раздела. Также за исключением одного режима (№ 6) наблюдается излом профиля температуры при прохождении через границу раздела жидкость—газ, который скорее всего связан с различной теплопроводностью жидкости и газа.

**Система этанол—воздух.** На рис. 6 представлены данные измерений температурного профиля на границе раздела этанол—воздух поперек слоев при локальном нагреве жидкости снизу. Позиция 0 соответствует границе раздела жидкость—газ, положительные значения координаты — положению в жидкости, отрицательные — в газе. Для определения профилей температуры проведена серия из более чем ста экспериментов. Подробные данные по каждому режиму нагревателя представлены в табл. 2. Как и в серии экспериментов с водой, профиль температуры в газе меняет угол наклона при увеличении мощности нагревателя. В отличие от экспериментов с водой, температура в газе всегда была выше температуры в жидкости. Это связано со значительно большими скоростями испарения и конвективным течением (табл. 2, столбец 10). Нелинейность температуры значительно усиливалась с повышением температуры нагрева. Существенная разница температур на межфазной поверхности вызвана также конвективными потоками, скорость которых повышается, за счет чего и наблюдается «смещение» границы раздела.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерены поперечные температурные профили в двухслойной системе жидкость—газ при нормальных атмосферных условиях для воды и этанола. Слой жидкости толщиной около 2 мм локально нагревался снизу и испарялся из кюветы диаметром 35 мм, в центре которой находился нагреватель диаметром 1.6 мм. Таким образом, в работе рассматривалась осесимметричная конфигурация. Кювета с жидкостью располагалась внутри бокса, так что испарение происходило в воздух с контролируемой влажностью (27–42%). Для точного измерения температурных профилей специально изготовлена микротермопара L-типа с толщиной королька около 3 мкм. Эксперименты проведены при квазистационарном режиме нагрева в диапазоне температур нагревателя 23–88°C для воды и 16–84°C для этанола при нормальном атмосферном давлении. Оцененная толщина слоя Кнудсена на межфазной границе мала по сравнению с толщиной микротермопары, поэтому в работе идет речь только о характерных профилях температуры при испарении и изменении теплового потока.

Получена подробная эволюция профиля температуры с увеличением мощности нагревателя. В зависимости от условий окружающей среды и типа жидкости температура в газовой фазе вблизи границы раздела жидкость—газ может быть выше или ниже, чем температура жидкости.

Для летучего этанола характер эволюции профиля температуры с увеличением мощности нагрева отличается от характера эволюции для воды. Температура в газовой фазе вблизи границы раздела жидкость—газ у этанола выше, чем в жидкости на границе раздела, во всем рассмотренном диапазоне температур при нормальном атмосферном давлении. Измеренная скорость испарения этанола намного выше, чем у воды, при одинаковых мощностях нагрева. В этаноле наблюдались профили температур, характерные для конвективного течения. Нелинейность профиля температуры значительно усиливалась с повышением температуры нагрева. Значительная разница температур на межфазной поверхности вызвана также конвективными потоками, скорость которых повышается, за счет чего и наблюдается «смещение» границы раздела.

Для воды температура в газовой фазе вблизи границы раздела жидкость—газ выше, чем температура жидкости при слабом нагреве, и ниже при относительно высоком нагреве. При слабом нагреве процесс переноса тепла в воде и в воздухе вблизи межфазной границы кондуктивный, т.е. имеет место практически линейный профиль температуры в жидкой и газовой фазах. С усилением нагрева наблюдался нелинейный профиль в жидкости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00722, <https://rscf.ru/project/20-19-00722/>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. V. 135. № 9. P. 091001-1.
2. *Чернышева М.А., Майданик Ю.Ф.* Моделирование тепломассопереноса в цилиндрическом испарителе контурной тепловой трубы с прямоугольным интерфейсом // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 3. С. 362.
3. *Васильев Н.В., Зейграник Ю.А., Ходаков К.А., Вавилов С.Н.* Паровые агломераты и сухие пятна как предвестники кризиса кипения недогретой жидкости в канале // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 3. С. 373.
4. *Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н.* Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 2. С. 280.
5. *Shankar P.N., Deshpande M.D.* On the Temperature Distribution in Liquid—Vapor Phase Change between Plane Liquid Surfaces // *Phys. Fluids A: Fluid Dynamics*. 1990. V. 2. № 6. P. 1030.

6. *Fang G., Ward C.A.* Temperature Measured Close to the Interface of an Evaporating Liquid // *Phys. Rev. E.* 1999. V. 59. № 1. P. 417.
7. *Duan F., Ward C.A., Badam V.K., Durst F.* Role of Molecular Phonons and Interfacial-temperature Discontinuities in Water Evaporation // *Phys. Rev. E.* 2008. V. 78. № 4. P. 041130.
8. *Kazemi M.A., Ward C.A.* Contribution of Thermocapillary Convection to Liquid Evaporation // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2021. V. 164. P. 120400.
9. *Gatapova E.Ya., Gaur I.A., Kabov O.A., Aniskin V.M., Filipenko M.A., Sharipov F., Tadrist L.* The Temperature Jump at Water–Air Interface During Evaporation // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2017. V. 104. P. 800.
10. *Labuntsov D.A., Kryukov A.P.* Analysis of Intensive Evaporation and Condensation // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 1979. V. 22. P. 989.
11. *Gaur I.A., Gatapova E.Ya., Moritz W., Batueva M.A.* Non-equilibrium Evaporation: 1D benchmark Problem for Single Gas // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2021. V. 181. 121997.
12. *Zhakhovsky V.V., Kryukov A.P., Levashov V.Y., Shishkova I.N., Anisimov S.I.* Mass and Heat Transfer between Evaporation and Condensation Surfaces: Atomistic Simulation and Solution of Boltzmann Kinetic Equation // *Proc. National Academy of Sciences of the United States of America.* 2019. V. 116(37). P. 18209.
13. *Гатапова Е.Я., Филипенко Р.А., Люлин Ю.В., Граур И.А., Марчук И.В., Кабов О.А.* Экспериментальное исследование температурного поля в двухслойной системе жидкость–газ // *Теплофизика и аэромеханика.* 2015. Т. 22. № 6. С. 729.
14. *Gatapova E.Ya., Filipenko M.A., Aniskin V.M., Kabov O.A.* A Contact Method for Simultaneous Measuring the Liquid Film Thickness and Temperature // *Interfacial Phenom. Heat Transfer.* 2018. V. 6. № 3. P. 187.
15. *Yarushev N.A.* Theoretical Basis of Non-stationary Temperature Measurement. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
16. *Nanigian J.* Eliminate Temperature Errors Caused by Conduction // *Adv. Mater. Process.* 1994. V. 146. № 6. P. 66.
17. *Attia M.H., Kops L.* Distortion in Thermal Field around Inserted Thermocouples in Experimental Interfacial Studies. Part II. Effect of the Heat Flow Through the Thermocouple // *J. Eng. Industry.* 1988. V. 110. № 1. P. 7.