

УДК 32.62; 536.4

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУЙ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ<sup>1</sup>

© 2023 г. Е. А. Чиннов\*

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

\*E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 03.09.2022 г.

После доработки 12.10.2022 г.

Принята к публикации 13.10.2022 г.

Выполнено исследование течения пленки воды вдоль вертикального нагревателя при числах Рейнольдса 33, 50 и 105 и начальных температурах  $T_0 = 15, 23, 30$  и  $40^\circ\text{C}$ . Показано, что амплитуды зигзагообразного движения струй возрастают с увеличением плотности теплового потока. Наиболее интенсивный рост амплитуд наблюдается при развитии термокапиллярной неустойчивости в верхней части нагревателя. При высоких тепловых потоках, когда амплитуда зигзагообразного перемещения достигает достаточно большой величины, начинается процесс взаимодействия струй. Выделены несколько типов взаимодействия струй на поверхности нагреваемой пленки жидкости. Показано, что появление термокапиллярной структуры в верхней части нагревателя приводит к перемещению струй и повышению интенсивности теплообмена.

DOI: 10.31857/S0040364423030055

## ВВЕДЕНИЕ

Пленочные течения широко используются в различных промышленных аппаратах и установках. Гравитационно стекающие пленки применяются в испарителях низкого давления при концентрировании пищевых продуктов и производстве фармакологических препаратов, в аппаратах для опреснения морской воды и в ректификационных колоннах. Пленочные течения используются в системах охлаждения, химических технологиях и др. Спектр практических приложений пленочных течений непрерывно расширяется, что стимулирует постановку и проведение новых экспериментальных и теоретических исследований этого класса течений. Понимание процессов, происходящих в нагреваемых пленках жидкости, очень важно для проектирования и создания таких устройств. Поэтому гравитационные течения жидкой пленки исследуются уже в течение длительного времени, привлекая внимание многих ученых.

Например, в работе [1] экспериментально установлено, что на тонкостенной фольге распространяющийся фронт повторного смачивания не является плоским и характеризуется ячеистой структурой с регулярными кипящими струями и межструйными зонами. Теоретически показано [2], что на поверхности пленки конденсата развиваются обусловленные неустойчивостью течения

естественные волны, которые существенно интенсифицируют теплоперенос. В работе [3] для расчета теплообмена в свободно стекающей пленке жидкости предложен полуаналитический метод, в котором поле температуры в жидкости представлено в виде ряда по базисным функциям, удовлетворяющим граничным условиям. Исследования влияния термокапиллярных сил на теплообмен в гладкой и волновой пленках жидкости содержатся в [4]. Показано, что на интенсивность теплообмена в стекающих пленках жидкости существенное влияние оказывают структура и характеристики волнового течения.

Гидродинамические двумерные волны в изотермических пленках жидкости неустойчивы к трехмерным возмущениям. Длина волны неустойчивости к поперечным трехмерным возмущениям убывает с ростом числа Рейнольдса [5]. Установлено, что переход от регулярных двумерных структур к трехмерному течению сопровождается существенным перераспределением жидкости в продольном направлении [6, 7]. Описаны характерные формы трехмерных структур, развивающихся в процессе перехода.

При течении пленок жидкости по нагреваемым поверхностям помимо гидродинамической неустойчивости, приводящей к развитию волнового течения, возникают также термокапиллярные неустойчивости за счет градиента поверхностного натяжения. Образующиеся в результате развития данных неустойчивостей структуры двух типов (А и В) различаются уровнями тепловых потоков и

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

величиной градиента поверхностного натяжения, необходимыми для их формирования, а также величиной межструйного расстояния [8].

При формировании термокапиллярной структуры в режиме А на поверхности пленки в верхней части нагревателя наблюдался высокий температурный градиент – до 10–15 К/мм. Граничное условие, близкое к  $T = \text{const}$ , было реализовано на поверхности нагревателя. Правильные структуры в виде трехмерных образований в пленке из 25%-ного спиртового раствора в воде, протекающей по плоскости с малогабаритным нагревателем  $6.5 \times 13 \text{ мм}^2$ , впервые обнаружены в [9, 10]. При тепловом потоке выше порогового значения на нагревателе образовывался горизонтальный вал, что приводило к движению жидкости в виде вертикальных струй и тонкой пленки между ними. Образование ривулетных структур на поверхности нагретой однокомпонентной жидкости MD-3F исследовалось в [11]. На сегодняшний день стационарные структуры типа А детально изучены экспериментально при  $Re < 12$ , а при больших числах Рейнольдса они наблюдались для воды в [12] при  $Re < 50$  и в [13] при  $Re = 50$ . Установлено, что расстояние между струями в режиме А не зависит от числа Рейнольдса и составляет для воды 10 мм. Теоретические исследования, как правило, ограничиваются анализом течения неизотермической безволновой жидкой пленки при малых числах Рейнольдса [14, 15]. В работе [16] подтверждено существование структуры типа А при  $Re \leq 2$ .

В режиме В струи формировались постепенно с увеличением теплового потока и расстояния от верхнего края нагревателя [8]. Граничное условие постоянства теплового потока было реализовано на поверхности нагревателя. Неоднородности в толщине жидкой пленки по всему потоку приводили к температурным неоднородностям на ее поверхности. Появлялся поперечный температурный градиент (до 1 К/мм), приводящий к увеличению поверхностной деформации жидкой пленки. Установлено, что расстояние между струями в режиме В также не зависит от числа Рейнольдса и составляет для воды 15 мм. Регулярные структуры в виде струй, стекающих по жидким пленкам вдоль нагретых поверхностей, изучены экспериментально в [17, 18]. Исследованы их характеристики. Подтверждено существование термокапиллярной структуры типа В.

В [19, 20] описаны экспериментальные методики, сочетающие одновременную планарную лазерно-индуцированную флуоресцентную и инфракрасную термографическую визуализацию, а также ее применение для измерения нестационарного и сопряженного теплообмена в тонких пленках жидкости. Обзор работ, посвященных формированию структур в пленках жидкости, представлен в [21].

Однако вопросы, связанные с взаимодействием набегающих волн с термокапиллярными структурами, формированием ривулетов, их движением и влиянием на теплообмен, требуют дальнейшего изучения. Ранее в основном исследовалось течение пленки жидкости при относительно малых тепловых потоках, не приводящих к взаимодействию струй. Целью данной работы является исследование зигзагообразного движения и взаимодействия трехмерных струй на поверхности нагреваемой пленки жидкости при числах Рейнольдса от 33 до 105 и их влияния на теплообмен.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с насосом, рабочий участок, фильтр, ротаметры, трубопроводы и запорную арматуру. Рабочий участок состоял из несущей плиты, на которую устанавливались пленкоформирователь, термостабилизатор и нагреватель. Рабочая жидкость (вода с красителем) с помощью насоса подавалась в пленкоформирователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Жидкость стекала по пластине и по соединительным каналам под действием гравитации, возвращаясь в резервуар с электронасосом. Эксперименты выполнены при числах Рейнольдса от 33 до 105:  $Re = W/(\rho v)$ , где  $W$  – удельный массовый расход жидкости,  $\rho$  – плотность жидкости,  $v$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

В качестве нагревательного элемента использовался медный плоский теплообменник шириной 150 мм и длиной 100 мм. Внутри теплообменника по прямоугольным каналам прокачивалась нагретая жидкость. Тепловой поток с поверхности нагревателя рассчитывался по разнице температур прокачиваемой жидкости на входе и выходе из теплообменника при заданном массовом расходе. Температура обращенной к пленке стенки нагревателя измерялась тремя термопарами, расположенными на вертикальной оси симметрии. Тепловой поток варьировался в пределах 0.5–11 Вт/см<sup>2</sup>. Вертикальный рабочий участок был открыт в атмосферу. Начальная температура воды на выходе из сопла пленкоформирователя составляла 15–40°C.

Для определения мгновенного поля толщины и волновых характеристик пленки использован модифицированный флуоресцентный метод. Отличительной особенностью компоновки измерительной системы в эксперименте является расположение источника и приемника излучения со стороны свободной поверхности пленки. Для возбуждения флуорофора использовался лазер с диодной накачкой RLM-532-2000, непрерывно освещающий площадку размером 120 × 120 мм<sup>2</sup>. Переизлученный флуорофором свет регистрировался циф-

ровой камерой PCO 1200h с разрядностью 10 бит и частотой 500 Гц в полнокадровом режиме ( $1280 \times 1024$  пикс.). Перед камерой установлен красный фильтр для отсекающего отраженного света лазера. При проведении измерений на площади  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup> система обеспечивает пространственное разрешение 0.1 мм.

В качестве флуоресцентного красителя в экспериментах использован родамин 6Ж. В диапазоне концентраций 10–100 мкмоль/л родамин 6Ж практически не влияет на поверхностное натяжение воды. Зависимость от температуры флуоресцентных свойств рабочих растворов красителя разных концентраций определялась экспериментально в диапазоне температур от 20 до 50°C. С целью обеспечения достаточного динамического диапазона яркости флуоресцентной жидкости для проведения экспериментов на нагревателе выбран раствор с концентрацией 20 мг/л (44.4 мкмоль/л). Температурное изменение яркости флуоресценции раствора такой концентрации при температуре 50°C не превышает 1% по сравнению с яркостью раствора при 20°C.

Калибровка измерительной системы производилась в условиях эксперимента. Измерялась интенсивность свечения рабочей жидкости известной толщины. Точность восстановления толщины плоской пленки по калибровочной зависимости составляет 5–10 мкм для пленок толщиной 200–400 мкм. Анализ перераспределения интенсивности, проведенный в приближении геометрической оптики, показал, что для режимов течения, реализованных в экспериментах, основной эффект, дающий ошибку, связан с фокусировкой под гребнями волн, что может приводить к незначительному завышению амплитуды этих волн. Однако в большинстве случаев уровень искажения достаточно мал и им можно пренебречь. Для исследованных режимов течения суммарная погрешность измерения толщины не превышает 3% для области пленочного течения и 7% в области струйного течения.

Распределение температуры на поверхности жидкой пленки измерялось с использованием инфракрасного сканера Titanium 570M. Система регистрировала инфракрасное (ИК) излучение в диапазоне длин волн 3.7–4.8 мкм. В данном диапазоне поверхность воды может рассматриваться как черное тело. Излучение от поверхности пленки, стекающей по поверхности пластины и нагревателя, проходило через объектив в приемник излучения. В качестве приемника использовалась матрица фотодиодов HgCdTe. Электрический сигнал, поступающий от приемника излучения, усиливался и преобразовывался аналого-цифровым преобразователем. Оцифрованные значения пересылались на персональный компьютер. Области с искусственными неоднородностями (вызванными сухими частями нагревателя) обрезались, и

получалась область  $60 \times 100$  мм<sup>2</sup>. ИК-сканер установлен на расстоянии 50 см от поверхности нагревателя под углом 5° к нормали поверхности. Небольшая величина угла дала возможность использовать полученные данные без дополнительной обработки. Подробное описание установки и методики исследования содержится в [13].

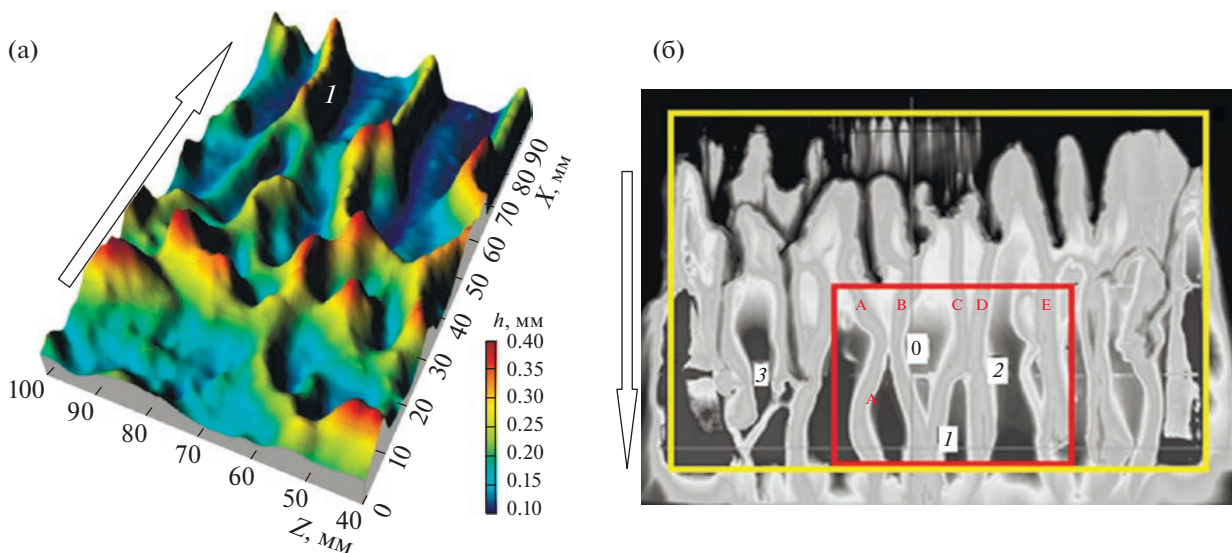
## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На поверхности пленки воды, вертикально стекающей вдоль нагревателя размером  $100 \times 150$  мм<sup>2</sup>, наблюдается формирование струй. Синхронные трехмерные волны уже сформированы к моменту достижения верхней кромки нагревателя. Вдоль нагревателя волны движутся друг за другом, но уже при малых тепловых потоках они смещаются на небольшие расстояния в поперечном направлении.

На рис. 1 показаны распределение толщины пленки в области нагрева ( $q = 4$  Вт/см<sup>2</sup>) и кадр тепловизионной съемки распределения температур на поверхности пленки воды в градациях серого при высокой плотности теплового потока ( $q = 10$  Вт/см<sup>2</sup>), позволяющий следить за зигзагообразным движением и взаимодействием струй. В верхней части нагревателя видны неоднородности температуры и толщины, соответствующие термокапиллярным структурам типа А. В нижней части нагревателя расстояние между струями возрастает, достигая в среднем 15 мм.

Видно, что при высоких тепловых потоках в результате взаимодействия волн с термокапиллярными структурами происходит формирование струй на поверхности пленки жидкости, их интенсивное перемещение в направлении поперек потока (витание) и взаимодействие (касание, сливание и разделение).

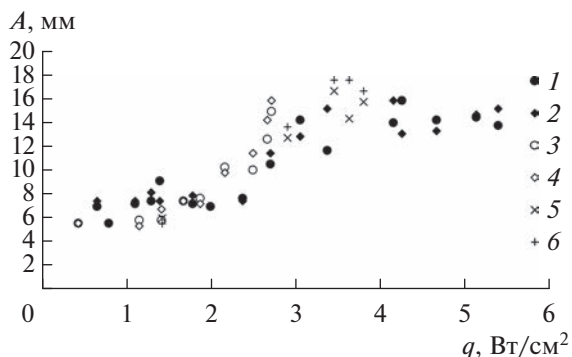
Для расчета амплитуды зигзагообразного движения струй проанализированы мгновенные профили температуры в поперечном сечении потока (по направлению  $Z$ ). Профили температуры обрабатывались с шагом 5–10 мм по  $X$ . На каждом мгновенном профиле определены минимумы температуры, соответствующие мгновенным положениям струй. Амплитуда зигзагообразного движения определялась как модуль максимального отклонения от среднего по времени положения центра струи. Для каждого момента времени рассчитывалась амплитуда витания струи для разных положений  $X$  вдоль нагревателя, из которых формировался временной ряд. Для анализа частотных характеристик витания рассчитывается преобразование Фурье от временного ряда амплитуды витания для каждого ривулета. Для ривулета находятся главная гармоника и частота, для которой значение амплитуды спектра максимально. Полученные доминирующие частоты в спектре осредняются для получения средней частоты витания ривулета для конкретного значения  $q$ .



**Рис. 1.** Мгновенные распределения толщины (а) и температуры (б) на поверхности пленки при (а) –  $Re = 50$ ,  $q = 4 \text{ Вт/см}^2$ ; (б) – 105, 10; желтый прямоугольник – область нагревателя, красный – область обработки данных по взаимодействию струй; А, В, С, D, Е – анализируемые струи; стрелки – направление течения.

Зависимости максимальной амплитуды витания струи в центре нагревателя от плотности теплового потока для двух значений расстояния вдоль нагревателя (50 и 75 мм) при  $Re = 33$  и 50 и начальной температуре жидкости 23, 30, 40°C представлены на рис. 2.

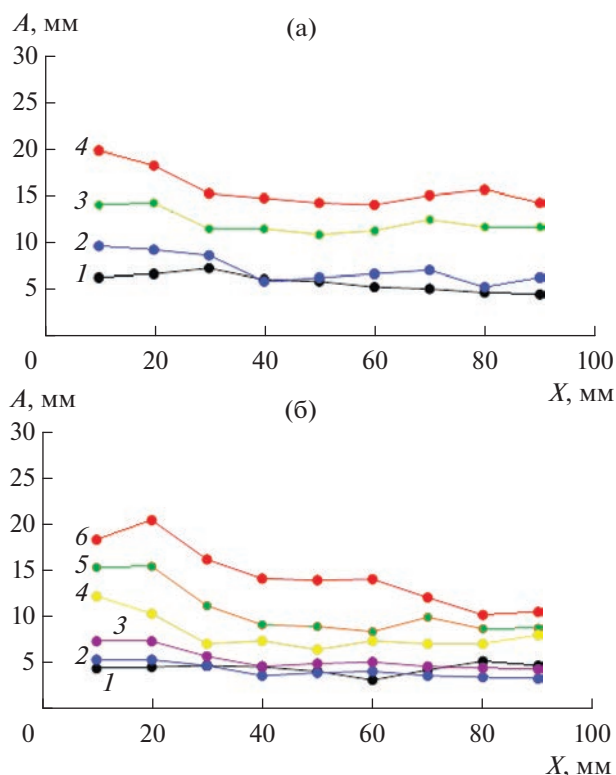
Можно выделить два режима витания струй. При малых плотностях тепловых потоков ( $q < 2 \text{ Вт/см}^2$ ) наблюдается движение струй с относительно малой амплитудой витания – в диапазоне 5–10 мм. В этом случае реализуется инерционно-термокапиллярный механизм витания струй в режиме В. Относительно слабые термокапиллярные силы из-за малых градиентов температуры на поверх-



**Рис. 2.** Зависимость максимальной амплитуды витания струи в центре нагревателя от плотности теплового потока на двух различных расстояниях вдоль нагревателя (50 и 75 мм): 1 –  $Re = 33$ ,  $T_0 = 23^\circ\text{C}$ , 50 мм; 2 – 33, 23, 75; 3 – 33, 30, 50; 4 – 33, 30, 75; 5 – 50, 40, 50; 6 – 50, 40, 75.

ности пленки, которые не превышали 1 К/мм, направляют гребень волны к центру струи. За счет инерционных сил волна проходит центральную линию. При более высоких плотностях тепловых потоков амплитуда витания струй резко возрастает (рис. 2). Как следует из рис. 1, это происходит за счет формирования термокапиллярных структур в режиме А в верхней части нагревателя. По достижении пороговой плотности теплового потока градиенты температуры на поверхности пленки в области верхней кромки нагревателя возрастали до 10 К/мм и более, что характерно для возникновения термокапиллярных структур типа А. Периодически эти структуры были видны достаточно отчетливо. Они формировались в остаточном слое перед фронтом набегающей волны вблизи передней кромки нагревателя.

На рис. 3 представлены графики зависимостей амплитуды зигзагообразного движения струй от расстояния вдоль нагревателя  $X$  при разных тепловых потоках для чисел Рейнольдса 50 и 105. При малых тепловых потоках струи движутся с относительно малой амплитудой витания (до 10 мм), причем эта амплитуда практически не изменяется вдоль нагревателя. С увеличением плотности теплового потока амплитуда возрастает, достигая значения в 20 мм в верхней части нагревателя, в результате взаимодействия с термокапиллярной структурой в режиме А. В этом случае амплитуды зигзагообразного движения струй уменьшаются вдоль нагревателя. Это уменьшение не является монотонным. Например, для  $Re = 50$  при  $X = 80$  мм наблюдается локальный максимум.

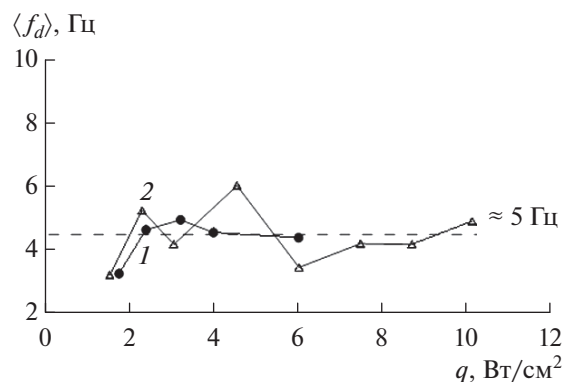


**Рис. 3.** Зависимости максимальной амплитуды витания струй от расстояния вдоль нагревателя при различных плотностях теплового потока: (а) –  $Re = 50$ : 1 –  $q = 1.7 \text{ кВт/см}^2$ , 2 – 2.4, 3 – 4.0, 4 – 6.02; (б) –  $Re = 105$ : 1 –  $q = 1.7 \text{ кВт/см}^2$ , 2 – 2.4, 3 – 3.06, 4 – 6.03, 5 – 7.49, 6 – 8.71.

Зависимость средней частоты витания струй для  $Re = 50, 105$  от плотности теплового потока  $q$  представлена на рис. 4. В исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса частота зигзагообразного движения струй остается постоянной и не зависит от плотности теплового потока.

Таким образом, показано, что развитие термокапиллярной неустойчивости в верхней части нагревателя приводит к росту амплитуд зигзагообразного движения струй. Максимальные значения амплитуд витания струй наблюдаются в верхней части нагревателя ( $X < 25 \text{ мм}$ ) при высоких тепловых потоках. В данной области трудно выделить и проследить эволюцию отдельных струй (см. рис. 1). В средней части нагревателя ( $25 < X < 75 \text{ мм}$ ) происходит взаимодействие струй. Амплитуда витания струй в этой области сопоставима со средним расстоянием между струями, что делает возможным их взаимодействие (рис. 1). В нижней части нагревателя амплитуда витания струй уменьшается, делая взаимодействие менее вероятным.

Для средней части нагревателя выполнен анализ взаимодействия струй при  $Re = 33$  и  $T_0 = 23^\circ\text{C}$ . Выделены несколько типов взаимодействия струй:



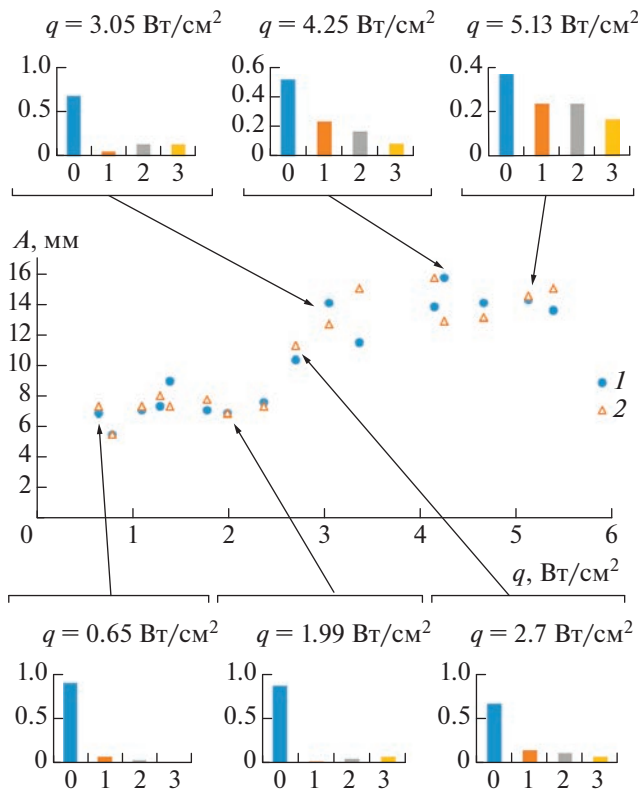
**Рис. 4.** Зависимости средней частоты витания струй для  $Re = 50$  (1), 105 (2) от плотности теплового потока  $q$ ; штриховая линия – усреднение приведенных данных.

0-й тип – отсутствие взаимодействия (рис. 1б), когда волна, движущаяся по гребню струи, проходит до конца нагревателя без взаимодействия с другими струями; 1-й тип – слияние, две струи сливаются в одну (цифра 1 на рис. 1а, 1б); 2-й тип – перемигивание, струи сливаются и снова разделяются (2 на рис. 1б); 3-й тип – разделение струи, когда одна струя разделяется на две (3 на рис. 1б).

Подсчитано количество взаимодействий каждого типа при разных тепловых потоках как при отсутствии структур А, так и при их наличии. Для каждого теплового потока учитывались взаимодействия только пяти струй в центре нагревателя, чтобы избежать влияния его конечных размеров. Просматривались по порядку все 600 кадров съемки тепловизором, фиксировались все случаи взаимодействий типов 1–3. В качестве типа 0 учитывались волны на поверхности струй, проходящие рассматриваемую область без взаимодействий. Далее количество взаимодействий каждого типа делилось на сумму всех взаимодействий, тем самым определялось, какая доля взаимодействий приходится на каждый тип. По полученным результатам построены гистограммы.

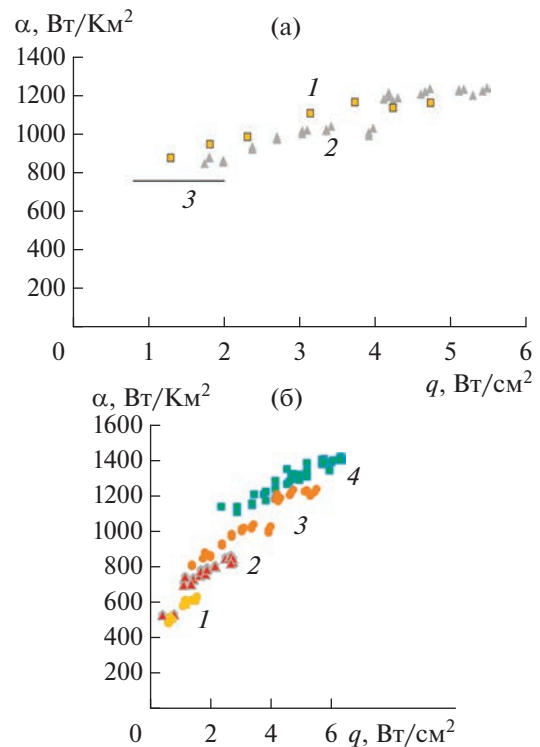
На рис. 5 представлены график зависимости максимальной амплитуды зигзагообразного движения струй от теплового потока на двух различных расстояниях от верхнего края нагревателя и гистограммы распределения разных типов взаимодействий для некоторых тепловых потоков. При достижении значения теплового потока, соответствующего появлению в верхней части нагревателя термокапиллярных структур типа А, наблюдаются пороговый рост максимальной амплитуды зигзагообразного движения струй и существенное изменение распределения взаимодействий по типам – доля взаимодействий типа 0 уменьшается, а типов 1–3 – увеличивается.

Зависимости среднего коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока представ-



**Рис. 5.** Зависимости максимальной амплитуды зигзагообразного движения струй от плотности теплового потока на расстояниях от верхней кромки нагревателя 50 (1) и 75 мм (2) и гистограммы распределения различных типов взаимодействий (указана относительная доля взаимодействий) при  $Re = 33$  и  $T_0 = 23^\circ C$ .

лены на рис. 6. Средний коэффициент теплоотдачи рассчитывается по зависимости  $\alpha = q / (T_w - T_0)$ , где  $q$  – плотность теплового потока,  $T_w$  – средняя температура поверхности нагревателя,  $T_0$  – начальная температура пленки. Результаты расчетов, выполненных с использованием модели Нуссельта [22] для гладкой пленки, показывают хорошую согласованность с экспериментальными данными для малого теплового потока (рис. 6а). Обнаружено усиление интенсивности теплоотдачи при тепловом воздействии. Коэффициент теплоотдачи повышался с увеличением теплового потока. Область наиболее интенсивного роста наблюдается в диапазоне изменения плотности теплового потока от 2 до 4 Вт/см<sup>2</sup>, где происходило увеличение амплитуды зигзагообразного движения струй за счет формирования термокапиллярных структур типа А. После формирования структуры при  $q \geq 4$  Вт/см<sup>2</sup> в верхней части нагревателя рост коэффициента теплоотдачи с увеличением плотности теплового потока не прекращается, но становится более плавным. Следует отметить, что взаимодействие струй, происходящее в этой области, не оказывает существенного влияния на интенсивность тепло-



**Рис. 6.** Зависимости среднего коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока: (а) 1 – экспериментальные данные для  $Re = 50$ , 2 –  $Re = 33$ , 3 – результаты расчета для гладкой пленки по модели Нуссельта [22]; (б) – экспериментальные данные для  $Re = 33$ : 1 –  $T_0 = 40^\circ C$ , 2 – 30, 3 – 23, 4 – 15.

обмена, но может приводить к повышению устойчивости пленки к разрыву. Перемещение и взаимодействие струй способствуют предотвращению появления сухих пятен на поверхности нагревателя, повторному орошению осушенных зон и в конечном счете увеличению теплового потока, соответствующего разрыву пленки жидкости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что развитие термокапиллярной неустойчивости в верхней части нагревателя приводит к росту амплитуды зигзагообразного движения струй. Максимальные значения амплитуд витания струй наблюдаются при высоких тепловых потоках, соответствующих формированию термокапиллярных структур в режиме А. Установлено, что перемещение струй в горизонтальном направлении вызывает при определенных условиях их взаимодействие (касание, слияние и разделение). Рост амплитуды перемещения струй приводит к интенсификации теплообмена. Отмечено, что взаимодействие струй, происходящее в данной области, не оказывает существенного влияния на интенсивность теплообмена, но может приводить к повышению устойчивости пленки к разрыву.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 22-19-20090 и Правительства Новосибирской области (соглашение № р-13).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павленко А.Н., Суртаев А.С., Цой А.Н., Стародубцева И.П., Сердюков В.С. Динамика повторного смачивания перегретой поверхности стекающей пленкой жидкости // ТВТ. 2014. Т. 52. № 6. С. 886.
2. Актершев С.П., Алексеенко С.В. Волновое течение пленки конденсата // ТВТ. 2014. Т. 52. № 1. С. 84.
3. Актершев С.П., Барташевич М.В., Чиннов Е.А. Теплоперенос в пленке жидкости в условиях постоянного теплового потока на стенке // ТВТ. 2017. Т. 55. № 1. С. 115.
4. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Влияние трехмерных деформаций на локальный теплообмен к неоднородно нагреваемой стекающей пленке жидкости // ТВТ. 2004. Т. 42. № 2. С. 269.
5. Park C.D., Nosoko T. Three-dimensional Wave Dynamics on a Falling Film and Associated Mass Transfer // *AIChE J.* 2003. V. 49. № 11. P. 2715.
6. Алексеенко С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М. и др. Особенности перехода от регулярного двумерного к трехмерному волновому движению на вертикально стекающих пленках жидкости // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 16. С. 16.
7. Алексеенко С.В., Бобылев А.В., Гузанов В.В. и др. О формировании струй при изотермическом пленочном течении жидкости в процессе перехода к трехмерному волновому движению // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 22. С. 97.
8. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 128.
9. Kabov O.A. Heat Transfer from a Small Heater to a Falling Liquid Film // *Heat Transfer Res.* 1996. V. 27. № 1. P. 221.
10. Kabov O.A., Diatlov A.V., Marchuk I.V. Heat Transfer from a Vertical Heat Source to Falling Liquid Film // *Proc. 1st Int. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation.* Rome, Italy. 1995. V. 1. P. 203.
11. Kabov O.A., Chinnov E.A. Heat Transfer from a Local Heat Source to a Subcooled Falling Liquid Film Evaporating in a Vapor-Gas Medium // *Rus. J. Eng. Thermophys.* 1997. V. 7. № 1–2. P. 1.
12. Чиннов Е.А. Влияние условий волнообразования на формирование струйного течения в нагреваемых пленках жидкости // *Теплофизика и аэромеханика.* 2009. Т. 16. № 1. С. 69.
13. Chinnov E.A. Formation of the Unsteady Thermocapillary Structures in the Residual Layer of Three-dimensional Waves // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2017. V. 108. P. 2053.
14. Scheid B., Oron A., Colinet P., Thiele U., Legros J.C. Nonlinear Evolution of Nonuniformly Heated Falling Liquid Films // *Phys. Fluids.* 2002. V. 14. № 12. P. 4130.
15. Kalliadasis S., Kiyashko A., Demekhin E.A. Marangoni Instability of a Thin Liquid Film Heated from Below by a Local Heat Source // *J. Fluid Mech.* 2003. V. 475. P. 377.
16. Frank A.M., Kabov O.A. Thermocapillary Structure Formation in a Falling Film: Experiment and Calculations // *Phys. Fluids.* 2006. V. 18. № 3. P. 032107.
17. Lel V.V., Stadler H., Pavlenko A.N., Kneer R. Evolution of Metastable Quasi-regular Structures in Heated Wavy Liquid Films // *Heat Mass Transfer.* 2007. V. 43. № 11. P. 1121.
18. Lel V.V., Kellermann A., Dietze G., Kneer R., Pavlenko A.N. Investigations of the Marangoni Effect on the Regular Structures in Heated Wavy Liquid Films // *Exp. Fluids.* 2008. V. 44. № 2. P. 341.
19. Markides C.N., Mathie R., Charogiannis A. An Experimental Characterization of Spatiotemporally Resolved Heat Transfer in Thin Liquid-film Flows Falling over an Inclined Heated Foil // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2015. V. 93. P. 872.
20. Mathie R., Nakamura H., Markides C.N. Heat Transfer Augmentation in Unsteady Conjugate Thermal Systems. Part II. Applications // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2013. V. 56. P. 819.
21. Chinnov E.A., Kabov O.A. Structures in the Falling Liquid Films // *Interfacial Phenom. Heat Transfer.* 2021. V. 9. № 4. P. 1.
22. Nusselt W. Der Wärmeaustausch am Berieselungskühler // *Zeitschrift des VDI.* 1923. Bd. 67. H. 9. S. 206.