

03.4

Взаимодействие струй на поверхности нагреваемой пленки жидкости

© Е.А. Чиннов, В.В. Семионов

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

E-mail: vitalik.semionov@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 августа 2022 г.

В окончательной редакции 7 октября 2022 г.

Принято к публикации 11 октября 2022 г.

Исследовано течение пленки воды вдоль вертикального нагревателя при числе Рейнольдса $Re = 33$ и начальной температуре $T_0 = 23^\circ\text{C}$. Выделено несколько типов взаимодействия струй на поверхности нагреваемой пленки жидкости. Показано, что появление термокапиллярной структуры в верхней части нагревателя приводит к перемещению и взаимодействию струй.

Ключевые слова: пленка жидкости, термокапиллярная неустойчивость, регулярные структуры.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.23.53946.19343

Гравитационно стекающие пленки широко применяются в различных промышленных аппаратах и установках: в испарителях низкого давления при концентрировании пищевых продуктов и производстве фармакологических препаратов, в аппаратах для опреснения морской воды и ректификационных колоннах. Пленочные течения используются в системах охлаждения, химических технологиях и др. Понимание процессов, происходящих в нагреваемых пленках жидкости, важно для проектирования и создания таких устройств.

Гидродинамические двумерные волны в изотермических пленках жидкости неустойчивы к трехмерным возмущениям. Длина волны неустойчивости к поперечным трехмерным возмущениям убывает с ростом числа Рейнольдса [1]. Установлено, что переход от регулярных двумерных структур к трехмерному течению сопровождается существенным перераспределением жидкости в продольном направлении [2,3]. Описаны характерные формы трехмерных структур, развивающихся в процессе перехода. Механизм образования струй обсужден в [3]: при прохождении трехмерной волны по остаточному слою жидкой пленки происходит боковой подсос жидкости под гребень волны и ее сброс через оставляемый волной след в виде дорожки с повышенной толщиной пленки. Дорожка, оставляемая волной, приводит к синхронизации волновой картины: волны выстраиваются в цепочки, благодаря чему подсос жидкости непрерывно осуществляется к одним и тем же участкам течения, что и приводит к формированию струй.

При течении пленок жидкости по нагреваемым поверхностям помимо гидродинамической неустойчивости, приводящей к развитию волнового течения, возникают также термокапиллярные неустойчивости разного типа, связанные с переносом жидкости вдоль границы раздела фаз вследствие возникновения градиента поверхностного натяжения [4]. Выделено два типа регулярных структур в нагреваемой пленке жидкости (*A* и *B*). Формирование трехмерной регулярной структуры (позже названной структурой типа *A*) в пленке 25% спирто-

водяного раствора, стекающей вдоль плоскости с нагревателем малого размера ($6.5 \times 13 \text{ mm}$) при невысоких числах Рейнольдса, было впервые обнаружено в экспериментах [5]. Исследование формирования термокапиллярных структур в режиме *B* в нагреваемой жидкой пленке при развитом волновом движении содержится в работах [6,7].

Изучение естественной эволюции развитых трехмерных волн в термокапиллярно-волновые струи при нагреве вертикально стекающей пленки воды в условиях малых градиентов температуры выполнено в [8] при $Re = 10$. Зарегистрирован факт деформации подковообразных гидродинамических волн при их прохождении через нагреваемую область. Показано, что на фронте трехмерной волны при движении вдоль нагревателя появлялись температурные неоднородности, которые за счет действия термокапиллярных сил приводили к деформации пленки жидкости и разрушению крупных волн. Установлено, что термокапиллярные силы также могут перемещать трехмерные волны среднего размера и части распавшихся крупных трехмерных волн в поперечном направлении, приводя к формированию струй в виде вертикальных ривулетных течений. Взаимодействие набегающих волн с термокапиллярными структурами при $Re = 50$ изучалось в работе [9].

В [10] исследовано перемещение струй поперек течения пленки (витание). Показано, что максимальная амплитуда витаний имеет пороговый рост при увеличении плотности теплового потока.

Целью настоящей работы является исследование разных типов взаимодействия трехмерных волн с термокапиллярными структурами (касания, слияния и разделения (раздвоения)) при числе Рейнольдса $Re = 33$ и начальной температуре пленки $T_0 = 23^\circ\text{C}$.

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,

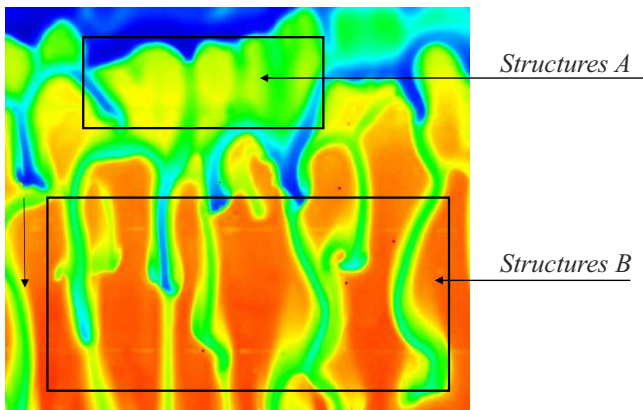


Рис. 1. Мгновенное распределение температур на поверхности пленки в центральной части (область размером 69×60 mm) нагревателя при $Re = 33$. Начальная температура пленки $T_0 = 23^\circ C$, $q = 4.15$ W/cm².

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 возвращалась в резервуар с электронасосом. В качестве нагревательного элемента использовался медный плоский теплообменник шириной 150 mm и длиной 100 mm, внутри которого прокачивалась горячая вода. Эксперименты выполнены при числе Рейнольдса $Re = 33$ ($Re = W/\rho\nu$, где W — удельный массовый расход жидкости, ρ — плотность жидкости, ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости).

Выполнено синхронное измерение температуры на поверхности вертикально стекающей пленки жидкости и распределения ее толщины в области нагревателя. В экспериментах использовался инфракрасный сканер Titanium HD 570M, позволяющий измерять поле температуры на поверхности пленки с разрешением до 640×512 пикселей, частотой полных кадров до 115 Hz и чувствительностью 18 мК. Для определения мгновенного поля толщины пленки использован модифицированный флуоресцентный метод. Для возбуждения флуорофора использовался лазер, непрерывно освещающий площадку размером 120×120 mm. Переизлученный флуорофором свет регистрировался цифровой камерой. Перед камерой был установлен красный фильтр для отсекающего отраженного света лазера. Синхронизация измерений полей толщин и температур осуществлялась с помощью светового сигнала. Подробное описание установки и методики исследования содержится в [9].

В результате взаимодействия волн с термокапиллярными структурами происходит формирование струй на поверхности пленки жидкости, их перемещение в направлении поперек потока (витание) и взаимодействие

друг с другом (рис. 1). Здесь и далее вертикальной стрелкой показано направление течения.

В качестве характеристики перемещения струй в поперечном направлении использовалась максимальная амплитуда витаний (A_r) — расстояние между крайним правым и крайним левым положением струи за время, кратное прохождению волны вдоль нагревателя. Для расчета амплитуды витания струи проанализированы мгновенные профили температуры в поперечном сечении потока (по направлению Z). Профили температуры обрабатывались в двух точках по оси X ($X = 50$ и 75 mm от верхнего края нагревателя), направленной вдоль течения пленки. На каждом мгновенном профиле определены минимумы температуры, соответствующие мгновенным положениям гребня струи.

Выделено несколько типов взаимодействия струй: тип 0 — отсутствие взаимодействия, когда волна, движущаяся по гребню струи, проходит до конца нагревателя без взаимодействия с другими струями; тип 1 — слияние, две струи сливаются в одну (рис. 2, a); тип 2 — перемычка, струи сливаются и снова разделяются (рис. 2, b); тип 3 — разделение струи, когда одна струя разделяется на две (рис. 2, c).

Был проведен подсчет количества взаимодействий каждого типа при разных тепловых потоках — как при отсутствии структуры типа A и заметных зигзагообразных движений струй (витаний), так и при их наличии. 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, 2 и 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 часть взаимодействий приходится на каждый тип. По полученным результатам строились гистограммы.

На рис. 3 представлены зависимость максимальной амплитуды зигзагообразного движения струй от теплового потока для двух разных расстояний от верхнего

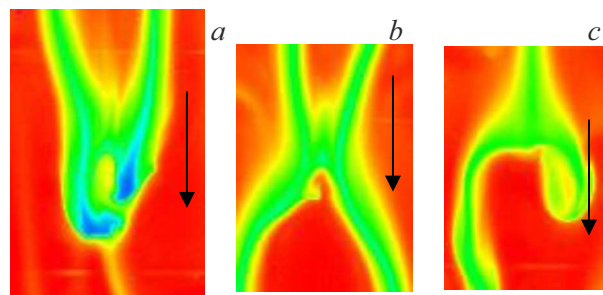


Рис. 2. Различные типы взаимодействия струй. Пояснение в тексте.

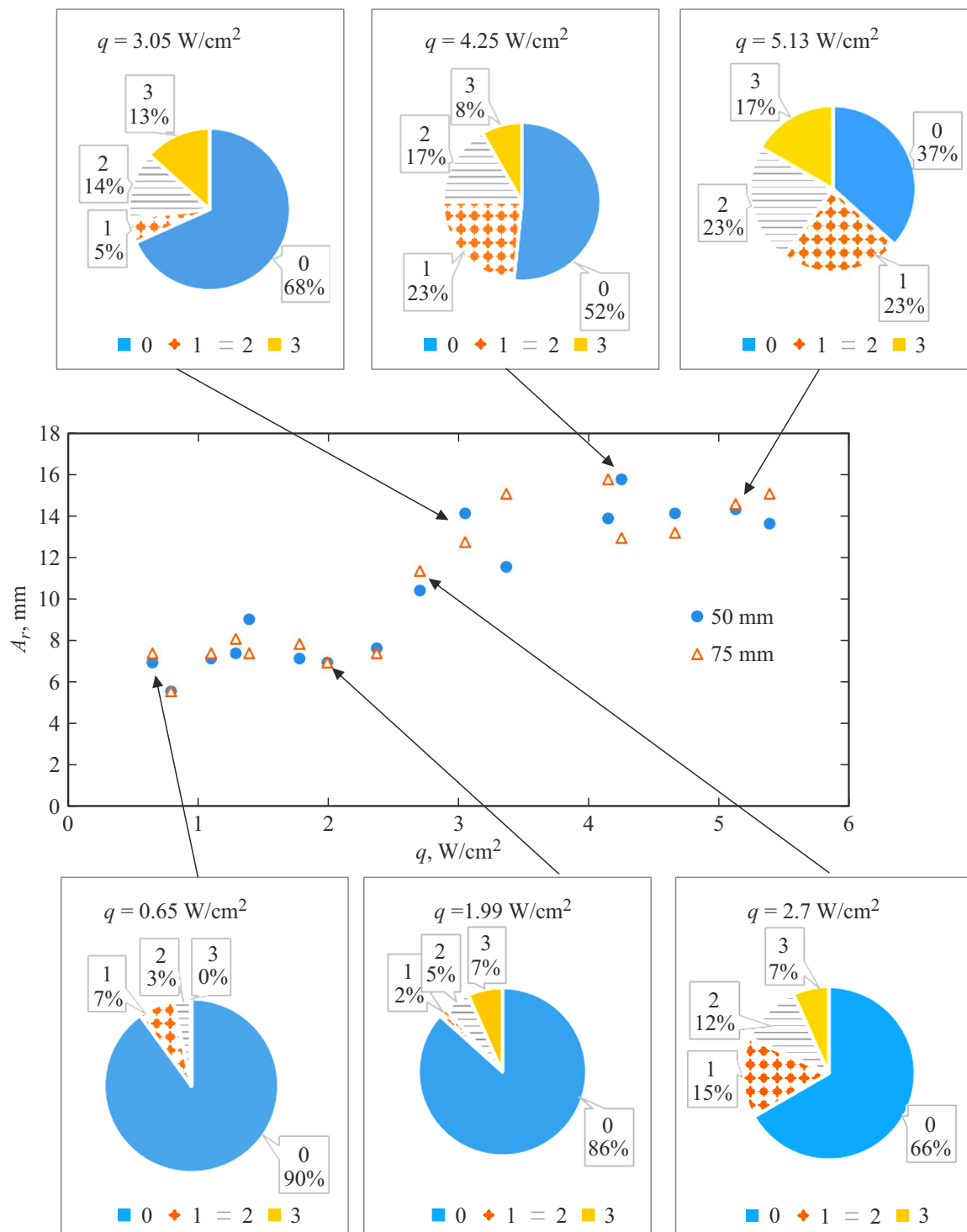


Рис. 3. Зависимость максимальной амплитуды витаний от теплового потока для двух расстояний от верхнего края нагревателя (50 и 75 mm) и гистограммы распределения различных типов взаимодействия.

края нагревателя и гистограммы распределения различных типов взаимодействий для некоторых тепловых потоков. При достижении значений теплового потока, соответствующих появлению в верхней части нагревателя термокапиллярной структуры типа А, наблюдаются пороговый рост максимальной амплитуды зигзагообраз-

ного движения струй и существенное изменение распределения взаимодействий по типам: доля взаимодействий типа 0 уменьшается, а типов 1–3 увеличивается.

Таким образом, 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. Впервые описано и проанализировано взаимодействие струй в нагреваемой пленке жидкости, выделены разные типы взаимодействия. Установлено, что рост амплитуды зигзагообразного перемещения струй в горизонтальном направлении приводит к их взаимодействию (касанию, слиянию и разделению (раздвоению)).

Перемещение и взаимодействие струй способствует предотвращению появления сухих пятен на поверхности нагревателя, повторному орошению осушенных зон и в конечном счете увеличению критического теплового потока, соответствующего разрыву пленки жидкости.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C.D. Park, T. Nosoko, *AIChE J.*, **49** (11), 2715 (2003). DOI: 10.1002/aic.690491105
- [2] С.В. Алексеенко, В.В. Гузанов, Д.М. Маркович, С.М. Харламов, *Письма в ЖТФ*, **38** (16), 16 (2012). [S.V. Alekseenko, V.V. Guzanov, D.M. Markovich, S.M. Kharlamov, *Tech. Phys. Lett.*, **38** (8), 739 (2012). DOI: 10.1134/S1063785012080159].
- [3] С.В. Алексеенко, А.В. Бобылев, В.В. Гузанов, Д.М. Маркович, С.М. Харламов, *Письма в ЖТФ*, **40** (22), 97 (2014). [S.V. Alekseenko, A.V. Bobylev, V.V. Guzanov, D.M. Markovich, S.M. Kharlamov, *Tech. Phys. Lett.*, **40** (11), 1031 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014110170].
- [4] Е.А. Чиннов, О.А. Кабов, *Прикладная механика и техническая физика*, **44** (5), 128 (2003). [E.A. Chinnov, O.A. Kabov, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **44** (5), 708 (2003). DOI: 10.1023/A:1025564605979].
- [5] О.А. Кабов, в сб. *Рос. нац. конф. по теплообмену* (Изд. дом МЭИ, М., 1994), т. 6, с. 90–95.
- [6] Е.А. Чиннов, А.Д. Назаров, А.В. Сапрыкина, А.Ф. Серов, *Теплофизика и аэромеханика*, **14** (1), 71 (2007). [E.A. Chinnov, A.D. Nazarov, A.V. Saprykina, A.F. Serov, *Thermophys. Aeromech.*, **14** (1), 67 (2007). DOI: 10.1134/S086986430701009X].
- [7] V.V. Lel, A. Kellermann, G. Dietze, R. Kneer, A.N. Pavlenko, *Exp. Fluids*, **44** (2), 341 (2008). DOI: 10.1007/S00348-007-0408-X
- [8] Е.А. Чиннов, Е.Н. Шатский, *Письма в ЖТФ*, **42** (19), 46 (2016). [E.A. Chinnov, E.N. Shatskii, *Tech. Phys. Lett.*, **42** (10), 997 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016100047].
- [9] E.A. Chinnov, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **108** (Pt B), 2053 (2017). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.070
- [10] V.V. Semionov, E.N. Shatskiy, E.A. Chinnov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1105**, 012074 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012074