

03

Амплитуды трехмерных волн в неизотермической пленке жидкости

© Е.А. Чиннов, С.С. Абдуракипов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет
E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 27 сентября 2012 г.

Выполнено измерение амплитуд трехмерных волн при течении пленки воды по вертикальной пластине с нагревателем. При нагреве стекающей жидкости термокапиллярные силы приводят к формированию струй и тонкой пленки между ними. Трехмерные волны распространяются по гребням струй, где с ростом плотности теплового потока и расстояния вдоль нагревателя толщины пленки и амплитуды волн увеличиваются, но относительная амплитуда волн не возрастает. В межструйной области нагреваемой пленки относительная амплитуда волн возрастает с уменьшением средней толщины (локального числа Рейнольдса). Сравнение полученных результатов при высоком значении числа Рейнольдса показало, что в межструйной области при высоких плотностях тепловых потоков величины относительной амплитуды значительно выше, чем для малых чисел Рейнольдса и изотермических пленок жидкости.

Изучение динамики развития трехмерных волн при формировании струйных течений в неизотермической пленке жидкости необходимо для более полного понимания механизма теплообмена и кризисных явлений при теплоотдаче к пленке, что в конечном итоге важно для повышения эффективности современных теплообменников промышленных аппаратов.

Исследование влияния термокапиллярных сил на распространение двумерных волн по поверхности пленки воды, стекающей по вертикальной трубе диаметром 254 мм, выполнено в [1]. Волны по поверхности пленки, стекающей по трубам малого диаметра при умеренных числах Рейнольдса, сохраняли двумерность вплоть до тепловых потоков, близких к соответствующим разрыву пленки, и регулярные вертикальные неоднородности зарегистрированы не были. Теоретическое исследование влияния термокапиллярных сил на двумерные волны выполнено в работах [1,2]. Показано, что при нагреве подложки термокапил-

лярыне силы вызывают рост амплитуды двумерных волн. В работе [3] обнаружен термокапиллярно-волновой механизм образования струй. Однако все эти исследования были выполнены при относительно малых числах Рейнольдса. Влияние термокапиллярных сил на гидродинамику и теплообмен в стекающих пленках жидкости при высоких числах Рейнольдса ранее не учитывалось [4,5].

В данной работе для измерения толщины и волновых амплитуд пленки жидкости в области ее нагрева при высоком числе Рейнольдса использован флуоресцентный метод, позволяющий исследовать динамику поверхности трехмерных волновых течений. Подробное описание метода проведено в [6].

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с насосом, рабочий участок, фильтр, ротаметры, трубопроводы и запорную арматуру. Температура натекающей жидкости, поверхности нагревателя, поверхности несущей пластины и паровоздушной смеси вблизи нагревателя измерялись термомпарами. Экспериментальное исследование формирования струй в пленке воды проводилось на вертикальной пластине с нагревателем размером 100×150 mm. При течении пленок воды в области исследуемых значений Re на поверхности нагревателя реализовывалось условие, близкое к $q = \text{const}$, где q — плотность теплового потока. Расстояние от распределительного устройства до верхнего края нагревателя составляло 263 mm. Число Рейнольдса пленки равнялось 300 ($Re = \Gamma/\mu$, где Γ — удельный массовый расход жидкости на единицу ширины пленки, μ — коэффициент динамической вязкости жидкости). Начальная температура жидкости T_0 была равна 30°C . Все свойства жидкости рассчитывались по среднemasсовой температуре T_F . Температура поверхности пленки определялась при помощи инфракрасного сканера.

На рис. 1 приведены мгновенные распределения толщины пленки жидкости в области измерения на нагревателе для $Re = 300$. На рисунках X — расстояние от верхней кромки нагревателя, Z — расстояние от правого края нагревателя в mm. Как видно из рис. 1, по гребню струи распространяются волны с большой амплитудой, а в межструйной области амплитуда волн существенно меньше. Значения ширины крупных трехмерных волн отличаются. В результате в межструйной области также могут проходить отдельные волны с относительно высокой амплитудой (рис. 1, *a*). Характерные продольные профили волн на струе и в межструйной области приведены на рис. 1, *b*. Для каждой выбранной

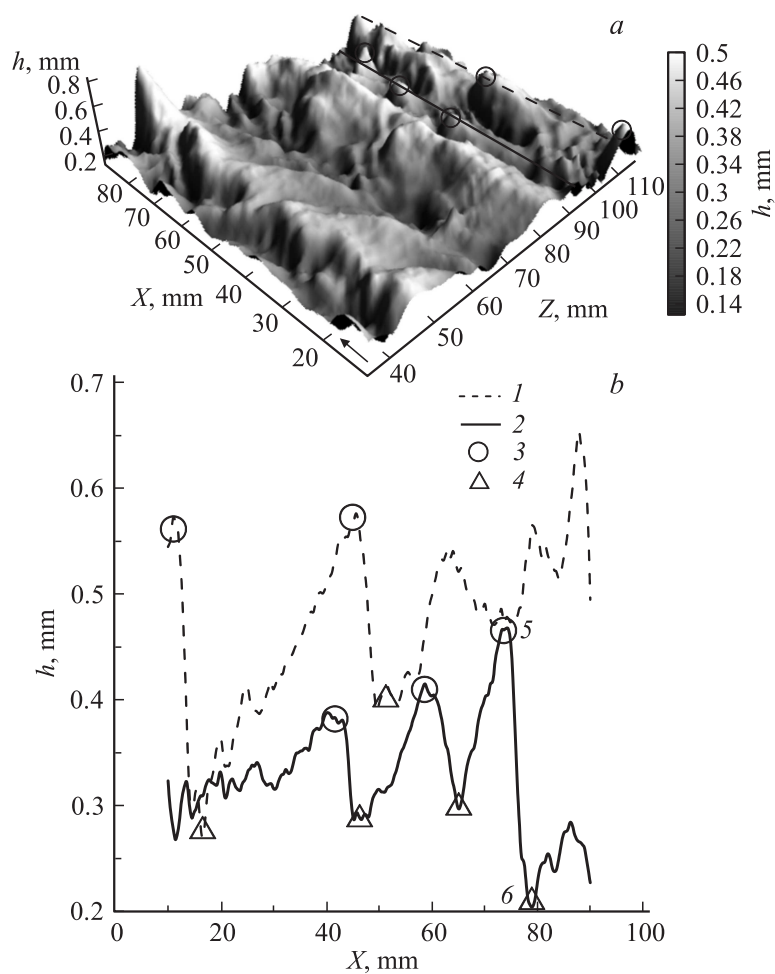


Рис. 1. *a* — мгновенное распределение толщины в нагреваемой пленке жидкости. *b* — продольные профили волн на струе и в межструйной области. Линии 1 и 2 указывают расположение продольных профилей толщины на гребне струи и в середине межструйной области соответственно. Цифрами 3 и 4 обозначены гребни и минимумы толщины трехмерных волн в струе и межструйной области. Стрелкой показано направление течения.

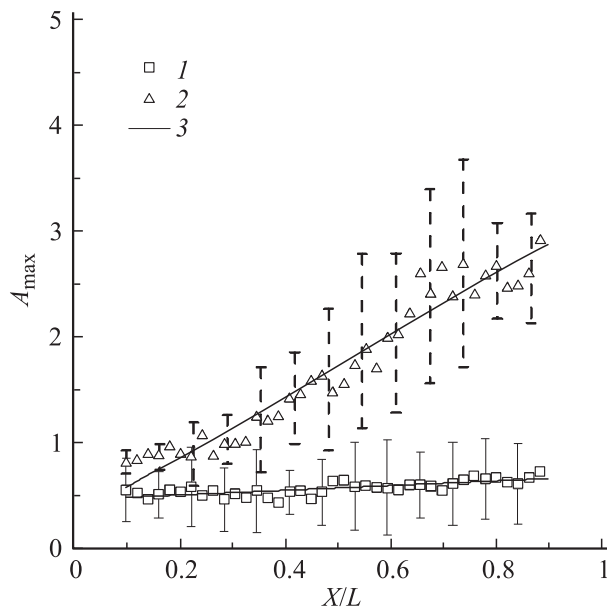


Рис. 2. Зависимость максимальной относительной амплитуды A_{\max} от безразмерной длины вдоль нагревателя, X/L ($q = 6.0 \text{ W/cm}^2$): 1 — данные для струй, 2 — для межструйных областей, 3 — прямые, аппроксимирующие экспериментальные данные.

точки X строились значения по 60 мгновенным измерениям толщины. Далее определялись максимумы толщины на гребне и минимумы перед гребнем, соответствующие крупным волнам. Значение h_{\max} вычислялось как наибольшее среди максимумов, соответствующих гребням крупных волн, а h_{\min} — как наименьшее среди минимумов, располагающихся перед гребнем волны. Выбранные значения h_{\max} и h_{\min} отмечены на рис. 1, b цифрами 5 и 6 соответственно.

На рис. 2 представлены опытные данные в виде зависимости максимальной относительной амплитуды A_{\max} от безразмерной длины вдоль нагревателя, L — длина нагревателя. Относительная безразмерная амплитуда $A_{\max} = (h_{\max} - h_{\min})/h_{av}$ является отношением разницы между наибольшим максимумом и наименьшим минимумом, соответствующим крупным волнам, к средней толщине h_{av} в области измерений.

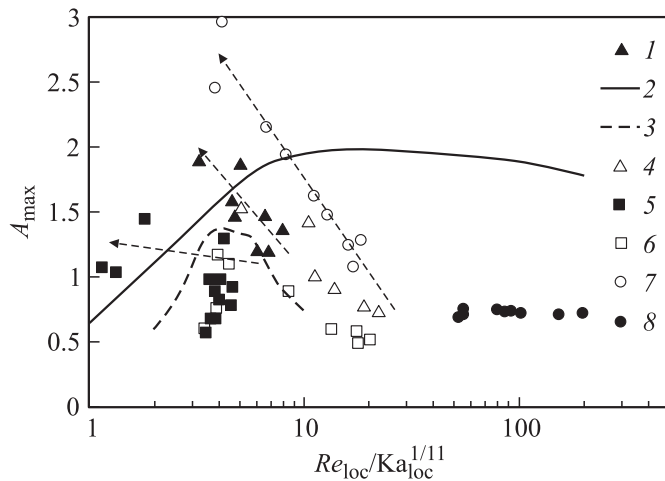


Рис. 3. Зависимость максимальной относительной амплитуды A_{\max} от $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$: 1 — межструйная область, $Re = 38$, $X_p = 344$ mm; 2 — зависимость из [4]; 3 — изотермическая пленка, $X_p = 360$ mm [6]; 4 — струя, $Re = 38$, $X_p = 344$ mm; 5 — межструйная область, $Re = 33$, $X = 264$ mm; 6 — струя, $Re = 33$, $x_p = 264$ mm; 7 — межструйная область, $Re = 300$, $X_p = 263$ mm; 8 — струи, $Re = 300$, $X_p = 263$ mm.

Значения A_{\max} получены усреднением отдельно по всем струям и межструйным областям по методике, аналогичной используемой в [6].

Для понимания механизма влияния нагрева на волновые характеристики пленки жидкости выполнено сравнение с изотермической пленкой жидкости [6] и ранее полученными данными для нагреваемой пленки жидкости при малых Re [7]. На рис. 3 показана зависимость максимальной безразмерной амплитуды A_{\max} от комплекса $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$. Локальные числа Рейнольдса и Капицы в точке измерений рассчитаны с учетом изменения локальной средней толщины пленки и температурной зависимости свойств жидкости: $Re_{loc}/Re = (h_{loc}/h_{q=0})^3 (\nu_{q=0}/\nu_{loc})^2$, $Ka_{loc} = \sigma_{loc}^3 / (g \nu_{loc}^4 \rho^3)$, σ_{loc} , ν_{loc} — коэффициенты поверхностного натяжения и кинематической вязкости воды в зоне измерения соответственно, ρ — плотность воды. Известно, что амплитуды волн стекающих изотермических пленок жидкости существенно зависят от числа Рейнольдса и длины пробега пленки. При $q = 0$ ранее полученные данные

хорошо согласуются с результатами [6] и с расчетами по зависимости из [4]. Они совпадают для почти одинаковых длин пробега пленки X_p (X_p — расстояние от нижнего края сопла пленкоформирователя до точки измерения) при $Re = 38$. Данные для $Re = 33$ лежат ниже кривой из [6], что объясняется меньшим значением длины пробега пленки. Данные, полученные для $Re = 300$ при малых тепловых потоках, расположены правее данных для изотермической пленки из [6] при $Re < 100$. Эти данные для струй и межструйной области при малых тепловых потоках, как и результаты [6,7], расположены ниже зависимости из [4] для стабилизированного волнового течения. Стабилизированное волновое течение изотермической пленки жидкости, характеризующееся отсутствием зависимости относительной амплитуды волны от длины пробега пленки, наступает, согласно [4], при $X_p = 600–4000$ mm. При увеличении теплового потока происходит изменение параметров Re_{loc} и $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$ за счет увеличения температуры и изменения толщины пленки. В области интенсивного формирования струй толщина пленки зависит от изменения плотности теплового потока. Параметры Re_{loc} и $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$ резко уменьшаются, а относительная амплитуда волн в межструйной области возрастает. В этом случае закономерности измерения относительной амплитуды волн существенно отличаются от изотермической пленки жидкости.

Можно заключить, что при высоких значениях числа Рейнольдса и длины пробега пленки данные, полученные при малых тепловых потоках, соответствуют изотермическому течению. Тенденция меняется в межструйной области при высоких тепловых потоках (пунктирные стрелки на рис. 3), сопровождающихся интенсивным формированием струй. Существует два механизма влияния термокапиллярных сил на движение волновой пленки жидкости. При движении пленки жидкости с двумерными волнами по нагретой поверхности с положительным градиентом температуры вдоль течения увеличение нагрева должно приводить к росту амплитуды волн, так как в этом случае термокапиллярные силы направлены от впадины к вершине волны [1,2]. Этот эффект проявляется в межструйной области, где относительная амплитуда волн возрастает с увеличением плотности теплового потока (уменьшением толщины пленки или комплекса $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$). Анализ термограмм показывает, что в случае трехмерных волн крупные волны в межструйной области (рис. 1, а) движутся в окружении более горячей жидкости. Термокапиллярные касательные напряжения направлены в

сторону гребня волны. В нижней части нагревателя в остаточном слое межструйной области термокапиллярные силы направлены поперек течения. Жидкость под действием поперечных касательных напряжений из остаточного слоя межструйной области перемещается в область струи. Два рассмотренных термокапиллярных эффекта в полной мере проявляются в межструйной области. Поперечные градиенты температуры вызывают существенное уменьшение толщины пленки жидкости, не оказывая влияния на амплитуду крупных волн. Градиенты температуры, направленные к вершине волны, приводят к росту относительной амплитуды волн. Амплитуды трехмерных волн при $Re = 300$ в отсутствие нагрева выше, чем при малых Re . Соответственно амплитуды волн в межструйной области также выше. Таким образом, гидродинамические факторы приводят к уменьшению относительной амплитуды волн с уменьшением Re_{loc} , в то время как термокапиллярные силы сохраняют ее изначально более высокое значение. На поверхности струй относительные амплитуды волн не возрастают с увеличением плотности теплового потока (толщины пленки или комплекса $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$), что качественно согласуется с течением изотермической пленки.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов президента РФ (НШ-6686.2012.8), РФФИ (проект № 12-01-00360) и СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 116).

Список литературы

- [1] Ito A., Masunaga N., Baba K. *Advances in Multiphase Flow*. Elsevier Science. 1995. P. 255.
- [2] Miladinova S., Slavtchev S., Lebon G. et al. // *Fluid Mech.* 2002. V. 453. P. 153.
- [3] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // *ПМТФ*. 2003. Т. 44. № 5. С. 128.
- [4] Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Моксклас, 1988. 232 с.
- [5] Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука. 1922. 255 с.
- [6] Drosos E.I.P., Paras S.V., Karabelas A.J. // *Intern. J. Mult. Flow*. 2004. V. 30. P. 853.
- [7] Чиннов Е.А., Харламов С.М., Назаров А.Д. и др. // *ТВТ*. 2008. Т. 46. № 5. С. 821–828.