

УДК 532.51

О влиянии микротекстуры на формирование пленки жидкости на вертикальной поверхности

Б.В. Перепелица

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

Email: perep@itp.nsc.ru

Выполнено визуальное исследование формирования пленки жидкости на поверхности цилиндра с микротекстурой. Показано влияние микротекстуры на эволюцию волн на поверхности пленки вязкой жидкости, стекающей по внешней поверхности вертикального цилиндра под действием гравитации в зависимости от числа Рейнольдса. Обнаружен эффект формирования микроволн на поверхности пленки с размером, соизмеримым с шагом микротекстуры.

Ключевые слова: стекающая пленка жидкости, регулярные структуры, микротекстура, волны.

Интенсивность протекания процессов тепло- и массообмена в различных аппаратах энергетического и химического производства определяется условиями течения поверхностных пленок жидкости и зависит от характера течения тонких пленок жидкости по рабочей поверхности. Использование пленочных течений объясняется высоким коэффициентом тепло- и массообмена и низким перепадом давления [1]. Уменьшение толщины пленки приводит к увеличению коэффициента теплообмена. Однако слишком тонкие пленки подвержены разрывам, возникновению сухих пятен и, как следствие, резкому ухудшению теплоотдачи и возможному тепловому разрушению охлаждающего элемента. Существуют различные механизмы, предотвращающие возникновение сухих пятен, один из них — нанесение микротекстуры на рабочую поверхность. При анализе теплообменных и массообменных процессов на таких поверхностях нужна информация о влиянии микротекстуры на характеристики пленочного течения. Изменение профиля поверхности пленки носит неупорядоченный трехмерный характер.

Изучению режимов течения и устойчивости свободно стекающей пленки жидкости по гладкой поверхности посвящены многие экспериментальные и теоретические работы [1–6]. Большое количество различных экспериментальных методов было развито и применено для исследования гидродинамических характеристик пленочного течения.

Устойчивая картина строго периодических волн на поверхности пленки наблюдается, как правило, при малых числах Рейнольдса в ограниченной области течения. В большинстве случаев форма, амплитуда и частота волнового движения меняются как по длине обтекаемой поверхности, так и во времени. Профиль волн

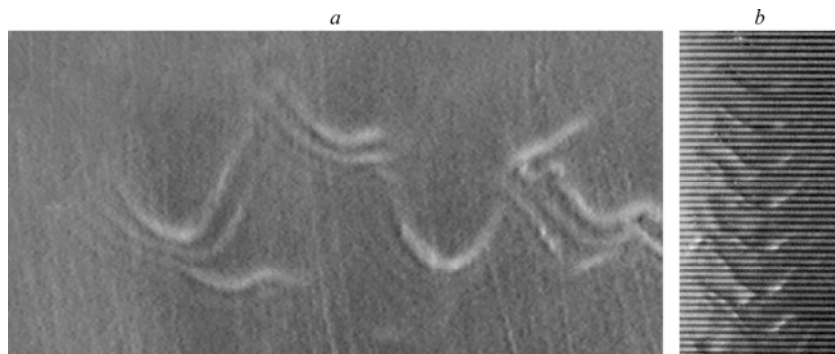


Рис. 1. Трехмерные волны на вертикально стекающей пленке жидкости.
 $Re = 120$ — гладкая пластина (а), 80 — пластина с микротекстурой (b).

и их форма в зависимости от режима течения имеют сложную трехмерную структуру. Влияние микротекстуры на формирование волн на пленке жидкости может быть очень существенным. В качестве примера на рис. 1, а приведена фотография волн на пленке жидкости, стекающей по вертикальной гладкой поверхности. Здесь же приведена фотография волн (см. рис. 1, b) при течении по поверхности с микротекстурой. Как видно на приведенных фотографиях, влияние микротекстуры может сильно сказываться на пленочном течении жидкости.

Стекание вязкой пленки по волнистой поверхности рассмотрено в работе [7]. В исследовании [8] показано, что течение вязкой пленки по гофрированной поверхности определяется числом Рейнольдса и капиллярным числом. В работе [9] исследованы структура и режимы течения пленки по гофрированной стенке. Влияние микротекстуры на волновую структуру поверхности пленки и локальный теплообмен в стекающих пленках смесей фреонов исследуется в работах [10, 11]. Установлено, что при малых расходах жидкости коэффициенты теплоотдачи на структурированной поверхности уменьшаются по сравнению с гладкой поверхностью. При больших расходах жидкости изменение структуры волновой поверхности пленки приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Общий вид рабочего участка представлен на рис. 2. Опыты проводились с двумя цилиндрами диаметром 30 мм: с гладкой поверхностью и с наклеенным на его поверхность алюминиевым листом с микротекстурой. Длина цилиндров составляла 250 мм. Поверхность второго цилиндра имела горизонтальную микротекстуру с шагом 1,75 мм и амплитудой 0,175 мм. В качестве рабочей жидкости использовался этанол. Жидкость под действием силы тяжести вытекает из резервуара с постоянным уровнем по распределительной системе. Распределительная система представляет собой тонкую щель, расположенную по всему периметру цилиндра.

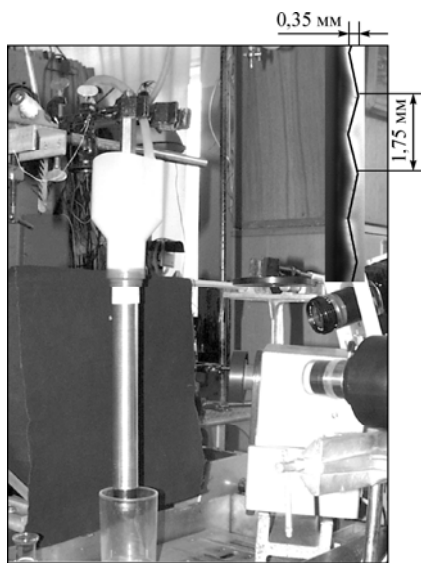


Рис. 2. Общий вид рабочего участка и профиля микротекстуры.

Поверхности цилиндров предварительно хорошо очищены. Таким образом, они хорошо смачиваются этанолом. Следует сразу отметить, что во всем диапазоне исследованных чисел Рейнольдса вся орошаемая поверхность цилиндров всегда смочена жидкостью, зоны сухих пятен отсутствуют. Особое внимание уделялось тому, чтобы избежать неоднородностей в толщине пленки. Жидкость, попадая на цилиндр, образует естественную однородную пленку. Пленка жидкости течет вниз по цилиндру в приемный бак, из которого она переливается в резервуар постоянного уровня. В экспериментах проводились визуальные наблюдения и видеосъемка течения пленки жидкости по поверхности цилиндров. Наблюдения проводились в диапазоне изменения числа Рейнольдса ($Re = 4q/\nu$, где q — расход жидкости в пленке на единицу ширины, ν — кинематическая вязкость жидкости) от 6 до 320. После того как устанавливался режим течения, проводилось фотографирование на расстоянии 10–15 см от распределителя. Во время эксперимента использовалась видеокамера, чтобы делать мгновенные снимки волнистой поверхности пленки. Размер видимой площади составлял 30×20 мм. Если первоначально сфотографировать кромку цилиндра без жидкой пленки, то затем можно определить толщину текущей пленки жидкости относительно сухой поверхности. Компьютерная обработка видеoinформации осуществлялась в цифровом коде.

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже на фотографиях представлены формы свободных границ в зависимости от числа Рейнольдса для гладкого цилиндра и цилиндра с микротекстурой (рис. 3, 4). При течении жидкости по гладкому цилиндру на поверхности пленки наблюдаются хорошо известные режимы течения [1, 2]. Течение в пленке является ламинарным безволновым, если ($Re < 15$). При больших значениях Re в верхней части цилиндра (~40 ÷ 50 мм) пленка остается гладкой, а затем начинают формироваться волны. Первоначально возникают двумерные периодические волны с длиной волны около 1 см. При $Re > 20$ амплитуда волн с удалением от верхней кромки цилиндра нарастает. С ростом Re амплитуда и частота волн увеличивается, а периодичность их движения нарушается. Наблюдения показывают, что независимо от расхода и расстояния между гребнями общий характер их профиля один и тот же: волна состоит из основного гребня с большой амплитудой и крутым фронтом, впереди которого бежит ряд мелких волн. На значительных отрезках между гребнями течение имеет ламинарный характер. На рис. 3 приведено также сравнение профиля волны с данными работы [1]. При $Re > 150$ вся

поверхность пленки покрыта сплошной волновой сеткой, которая имеет нерегулярную трехмерную структуру. При этом образуются характерные подковообразные волны.

На цилиндре с микротекстурой 0,35 мм при $Re < 15$ пленочные течения различаются мало (см. рис. 4). Жидкость заполняет канавки микро-

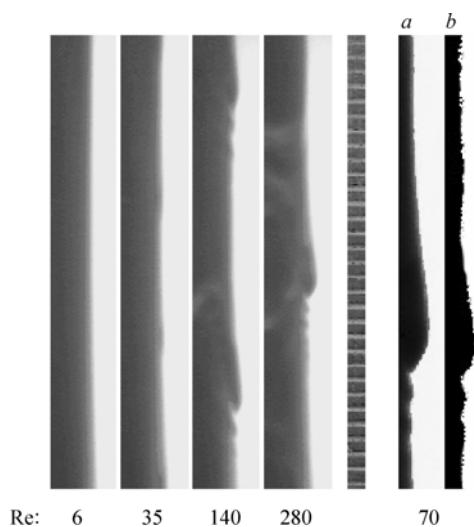


Рис. 3. Профили волн при стекании пленки по поверхности вертикальной гладкой трубы в диапазоне изменения числа Рейнольдса ($Re = 4q/\nu$) от 6 до 280 и сравнение полученного характерного профиля одиночной волны (а) с результатом, приведенном в работе [1] (b) (шаг штрихов масштабной линейки равен 1 мм).



Рис. 4. Профили волн при стекании пленки по поверхностям вертикальной трубы с микротекстурой 0,35 мм в диапазоне изменения числа Рейнольдса ($Re = 4q/\nu$) от 6 до 320 (шаг штрихов масштабной линейки равен 1 мм).

текстуры и образуется устойчивое течение с практически прямолинейной свободной границей пленки, как и на гладком цилиндре. В диапазоне $15 < Re < 160$ на свободной границе пленки образуются волны с длиной, приблизительно равной длине волн на гладкой стенке. С увеличением расхода жидкости амплитуда волн нарастает. При числах $Re > 40$ пленочное течение принимает неустойчивый трехмерный характер. При $Re \sim 170$ (см. рис. 4) возникают дополнительные возмущения, и поверхность пленки покрывается

волнами с более сложной структурой, чем на гладкой поверхности. На поверхности пленки появляются мелкие волны с характерными размерами, равными шагу микротекстуры. Дальнейшее повышение расхода жидкости приводит к образованию еще более мелкомасштабных структур. Площадь поверхности при этом возрастает, что может приводить к интенсификации процессов массообмена.

ВЫВОДЫ

Наличие горизонтально ориентированной микротекстуры приводит к возникновению более сложной структуры на поверхности пленки, чем на гладкой поверхности. Пленка покрывается волнами с характерными размерами, равными шагу микротекстуры. Площадь поверхности при этом возрастает, что может приводить к интенсификации процессов тепло и массообмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капица П.Л., Капица С.П. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости // ЖЭТФ. 1948. Т. 19, Вып. 1. С. 105–120.
2. Alekseenko S. V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Wavy liquid film flow. Novosibirsk: Nauka, 1992. 313 p.
3. Шкадов В.Я. Волновые режимы течения тонкого слоя вязкой жидкости под действием силы тяжести // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1967. № 1. С. 43–51.
4. Chang H.-C. Wave evolution on a falling film // Annu. Rev. Fluid Mech. 1994. Vol. 26. P. 103–136.
5. Ганчев Б.Г. Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими пленками. М.: Энергоатомиздат, 1987. 192 с.
6. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Мокслас, 1988. 232 с.
7. Трифионов Ю.Я. Стеkanie вязких пленок по волнистым поверхностям // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Т. 45, № 3. С. 97–110.
8. Vlachogiannis M., Bontozoglou V. Observations of solitary wave dynamics of film flows // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 435. P. 191–215.
9. Zhao L., Cerro R. L. Experimental characterization of viscous film flows over complex surfaces // Intern. J. Multiphase Flow. 1992. Vol. 6. P. 495–516.
10. Pavlenko A., Pecherkin N., Chekhovich V., Volodin O. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // Microgravity Sci. Technol. 2009. Vol. 21, Suppl 1. P. 207–213.
11. Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Володин О.А. Локальный теплообмен в стекающих пленках смесей фреонов на структурированной поверхности // Теплофизические основы энергетических технологий. Сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф., Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. С. 31–35.

Статья поступила в редакцию 22 июня 2010 г.