

РУЧЕЙКОВОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ПО НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАКЛОННОГО ЦИЛИНДРА

УДК 532.517.2+532.612

С. В. Алексеенко, Д. М. Маркович, В. Е. Накоряков, С. И. Шторк

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Введение. Стекающие пленки жидкости являются широко распространенным объектом в природе и технике. В литературе большинство исследований посвящено однородным пленкам жидкости, стекающим по вертикальному цилиндру или наклонной плоскости [1, 2]. В конденсаторах и теплообменниках часто применяется также горизонтальная труба. В этом случае толщина пленки сильно меняется по периметру трубы, но остается однородной вдоль ее образующей. В настоящее время считаются перспективными и уже используются конденсаторы и теплообменники со слабонаклонными трубами. Такое оборудование имеет высокую эффективность, поскольку конденсат собирается на нижней образующей трубы, а на остальной поверхности теплообмена может реализоваться режим капельной конденсации. В литературе отсутствуют систематические исследования подобных процессов.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению закономерностей течения вязкой жидкости по наружной поверхности наклонного цилиндра при струйном орошении.

Экспериментальное оборудование. Схема эксперимента изображена на рис. 1. Рабочий участок — стеклянная труба с наружным диаметром $D = 19$ мм и длиной 1 м. Размеры трубы являются характерными для теплообменного оборудования. Жидкость на рабочий участок подается в виде струи, истекающей из сужающегося сопла диаметром $d = 1 \div 3$ мм. Расстояние δ от сопла до поверхности цилиндра менялось от 0 до 10 мм, а угол наклона цилиндра α — от 2 до 15°.

Основная форма движения жидкости на наклонном цилиндре — ручейковое течение вдоль нижней образующей. В зарубежной литературе такое течение называется ривулетом. Хорошо известно, что на движение ривулета определяющее влияние оказывают контактный угол (смачиваемость) и его гистерезис [3]. Последний эффект приводит к тому, что ривулет движется непредсказуемым способом в виде змейки, вследствие чего

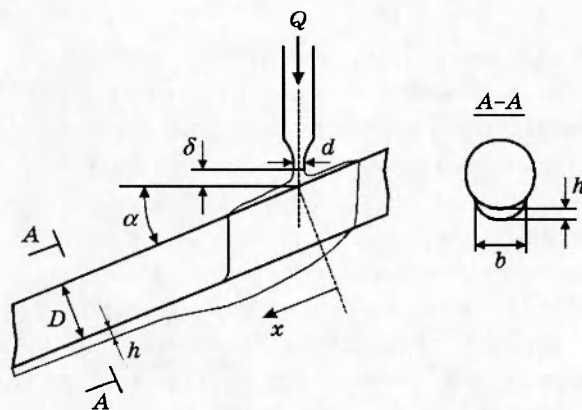


Рис. 1

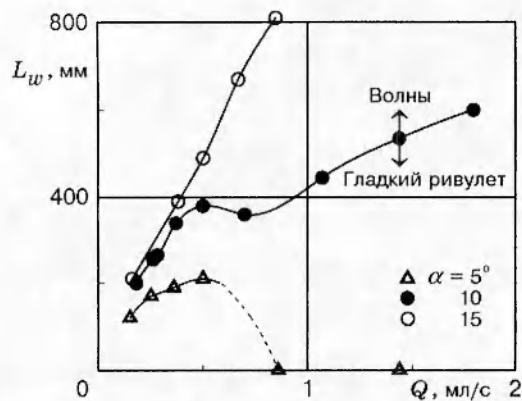


Рис. 2

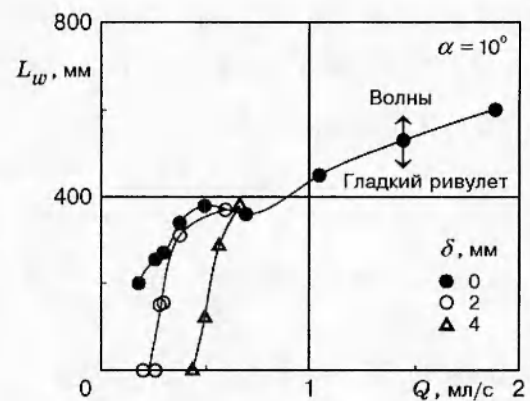


Рис. 3

невозможно получить однозначные характеристики течения. Основное достижение данной работы состоит в том, что удалось сформировать ривулеты со строго постоянными параметрами, благодаря чему оказалось возможным в деталях изучить гидродинамику ручейкового течения. С этой целью стеклянная трубка шлифовалась притирочными порошками так, чтобы получилась матовая поверхность, а в качестве рабочей жидкости использовался этанол. В результате формировался ривулет постоянной ширины с нулевым контактным углом.

Рабочая жидкость при температуре 20°C имеет следующие физические свойства: плотность 805 кг/м^3 , кинематическую вязкость $\nu = 1,49 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, кинематический коэффициент поверхностного натяжения $29,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Расход жидкости Q менялся в пределах $0,045 \div 4,0 \text{ мл/с}$. Характерный диапазон изменения числа Рейнольдса Re , определенного как $Re = Q/(b\nu)$, составил $3,8 \div 270$ (для $\alpha = 10^\circ$). Здесь b — ширина ривулета (рис. 1).

В ходе эксперимента производилась видео- и фотосъемка картин течения, измерялись волновые характеристики и толщина ривулета, а также определялась величина уноса жидкости. Локальная толщина ривулета h , которая определена как максимальная толщина слоя жидкости в поперечном сечении ривулета (рис. 1), измерялась теневым методом [1]. Его суть заключается в регистрации тени, отбрасываемой слоем жидкости при боковом освещении цилиндра. Для преобразования перемещения границы тени в электрический сигнал применялся фотодиод. Далее сигнал обрабатывался на персональном компьютере. Толщина гладкого ривулета измерялась также индикатором часового типа с ценой деления $0,01 \text{ мм}$.

Результаты эксперимента. При натекании струи на наклонный цилиндр можно выделить три основные зоны течения: свободно падающей струи, непрерывной жидкой пленки, ручейкового течения (или ривулета). В этой работе главное внимание уделено ривулету как основной форме движения жидкости на наклонной поверхности. В исследованном диапазоне углов наклона цилиндра α длина зоны непрерывной пленки составляет всего лишь несколько сантиметров.

Как и в случае стекающих пленок жидкости [1], ручейковое течение неустойчиво. Неустойчивость течения приводит к образованию нелинейных поверхностных волн сложной структуры. На волнообразование существенным образом влияют начальные условия, в частности расстояние δ между соплом и поверхностью трубы. При малых расходах жидкости Q и определенных значениях δ наблюдался автоколебательный режим истечения струи, а также распад струи на капли. В обоих случаях волнообразование начинается непосредственно в зоне орошения, и характеристики волн определяются частотой начальных

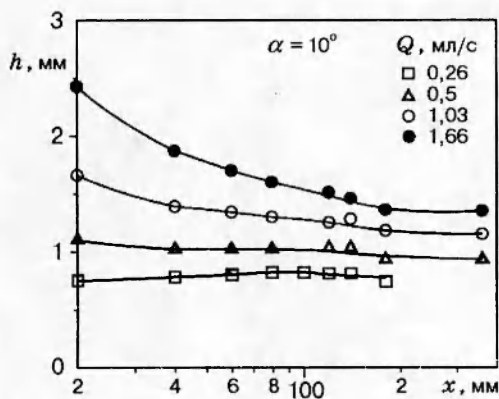


Рис. 4

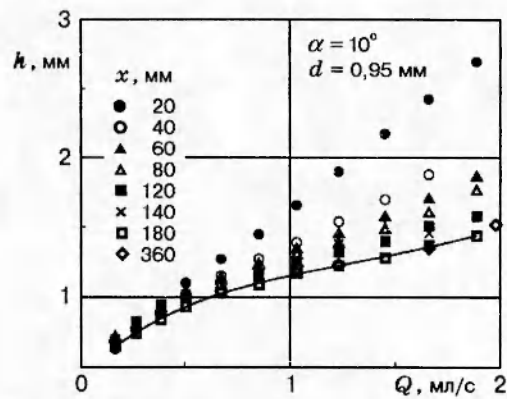


Рис. 5

возмущений. Подобные волновые режимы эквивалентны возбужденным волнам, описанным в [1, 2].

При достаточно больших расходах Q и малых δ ($0 \div 1$ мм) возмущения в зоне орошения отсутствуют. В этом случае волны возникают за счет естественной неустойчивости течения и впервые наблюдаются на некотором расстоянии L_w от точки орошения. Такие волны будем называть естественными. Координата точки волнообразования показана на рис. 2 в зависимости от расхода Q для разных углов наклона цилиндра. При этом $\delta = 0$, т. е. начальные возмущения отсутствуют. При больших углах наклона течения ($\alpha \geq 15^\circ$) длина гладкой зоны растет с увеличением расхода, однако при малых углах ($\alpha \leq 5^\circ$) с увеличением Q достигается локальный максимум L_w . Затем L_w уменьшается и при критическом значении расхода Q достигает нуля. В последнем случае вся поверхность ривулета покрыта волнами.

Рис. 3 демонстрирует влияние расстояния между соплом и поверхностью цилиндра на координату точки волнообразования. Как и следовало ожидать, в области малых расходов Q увеличение δ приводит к появлению начальных возмущений и резкому сокращению гладкой зоны. Приведенные данные свидетельствуют о более сложных закономерностях возникновения волн на ривулетах по сравнению с однородными пленками [1].

Для слабонаклонных течений вязких слоев жидкости, как известно, существует довольно протяженный начальный участок, на котором происходит гидродинамическая стабилизация течения. При этом меняются поле скоростей и толщина слоя. В данной работе исследовано установление толщины ривулета, под которой подразумевается ее максимальное значение h в поперечном сечении (см. рис. 1). Примеры распределений толщины гладкого ривулета вдоль продольной координаты x для разных расходов Q представлены на рис. 4. Как видно, для исследованного диапазона расходов длина начального участка не превышает $180 \div 200$ мм. Значения h в зависимости от Q приведены на рис. 5 (линия соответствует установившемуся течению).

Отличительной особенностью ривулета на нижней стороне наклонного цилиндра является срыв жидкости с поверхности раздела фаз. Для каждого угла α существует критическое значение расхода, начиная с которого происходит унос жидкости. Обнаружено два типа уноса: капельный и струйный. Капельный унос наблюдается с гребней крупных волн, а струйный возникает в области орошения. На рис. 6 приведены данные по толщине ривулета в области стабилизации в зависимости от расхода Q . Расслоение экспериментальных точек происходит по углу α . Для каждой эмпирической прямой указана граница E по расходу Q , за пределами которой начинается интенсивный капельный унос. Слева указана также граница начала волнообразования W .

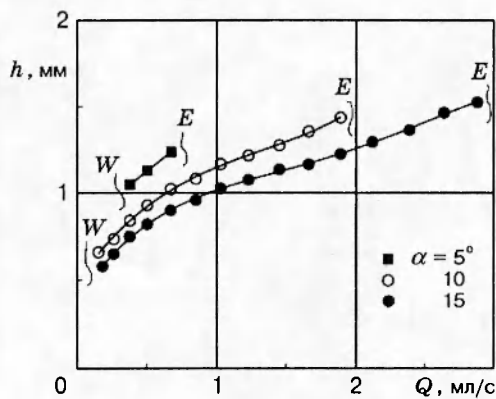


Рис. 6

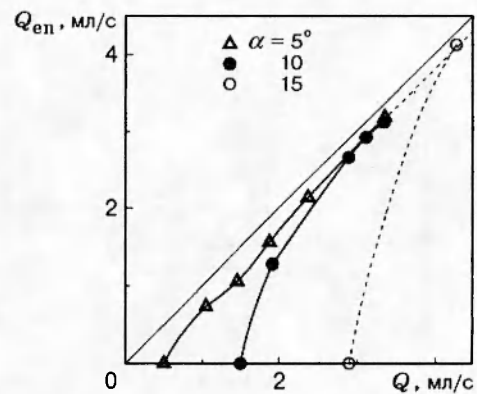


Рис. 7

Интенсивность уноса (расход) $Q_{\text{еп}}$ зависит от начального расхода Q и угла наклона α (рис. 7). Однако в случае больших значений начального расхода ($Q > 2; 2,8; 4,2$ мл/с при $\alpha = 5; 10; 15^\circ$) интенсивность уноса прямо пропорциональна расходу Q и не зависит от α . Это означает постоянство расхода в установившемся ручейковом течении. Величина расхода ($Q - Q_{\text{еп}}$) составляет приблизительно 0,25 мл/с.

Еще одним важным параметром течения является ширина ривулета, т. е. область смоченной поверхности цилиндра. Как оказалось, в исследованном диапазоне параметров ширина ривулета b не зависит от расхода жидкости. На рис. 8 приведены данные по ширине ривулета для $\alpha = 10^\circ$ и $x = 260$ мм (точки — экспериментальные результаты настоящей работы, линия — расчет [4]). Зафиксированный факт постоянства ширины ривулета согласуется с предсказаниями единственной теоретической работы [4] и чрезвычайно важен для анализа процессов теплопереноса в теплообменниках с наклонными трубами.

На рис. 9 сравниваются зависимости h от Q , полученные в [4] и в настоящей работе ($\alpha = 10^\circ$ и $x = 180$ мм). Используются экспериментальные данные как для гладкого течения, так и для волнового. В целом наблюдается хорошее согласие. Но систематическое отклонение экспериментальных точек от теоретической кривой при крайне малых расходах требует объяснения. Заметим, что вследствие сильно неоднородной по периметру цилиндра толщины слоя жидкости расчетная зависимость $h(Q)$ существенно отличается от кубического закона Нуссельта для плоской пленки [1].

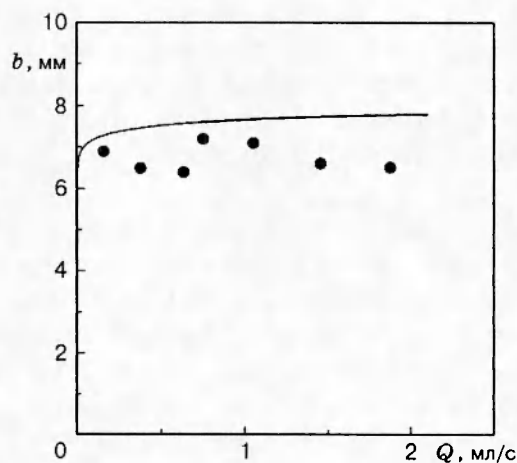


Рис. 8

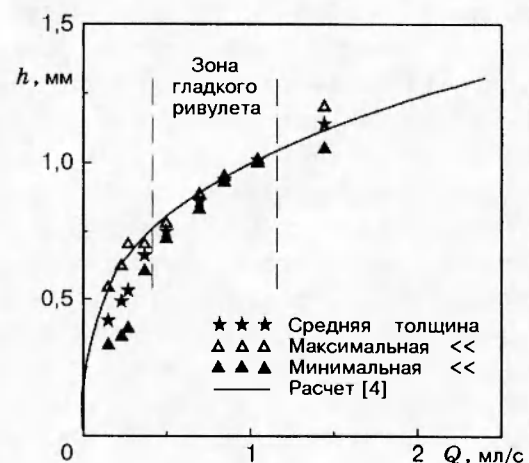


Рис. 9

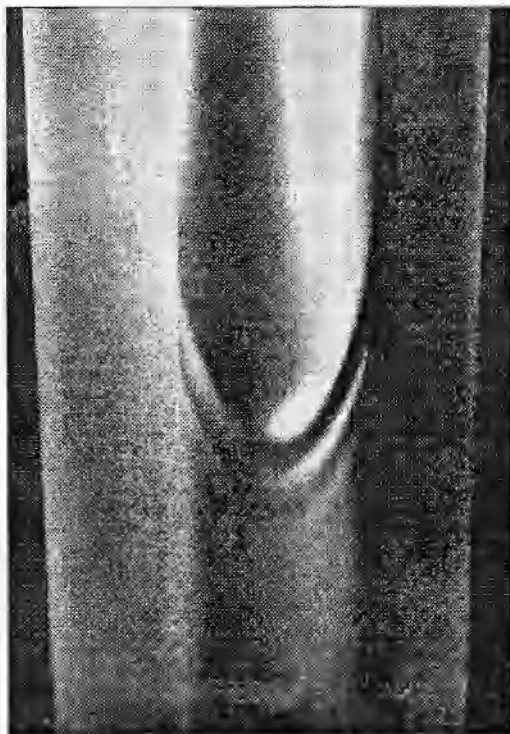


Рис. 10

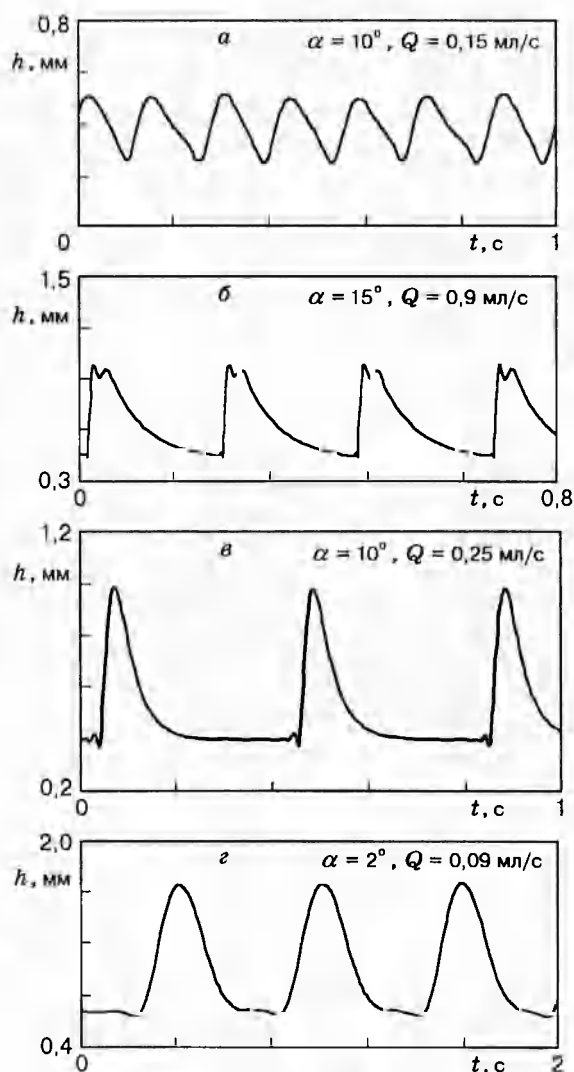


Рис. 11

Из эксперимента следует, что волновой режим является типичным режимом ручейкового течения. В отличие от пленочных течений волны на ривулете всегда трехмерные, как это видно из фотографии ривулета на рис. 10 (вид снизу). Однако достаточно малая ширина ривулета приводит к тому, что поперечный размер волны совпадает с шириной жидкостного потока. По этой причине реализуются детерминированные волны, которые в деталях можно описать на эксперименте.

Наиболее характерные осциллограммы поверхностных волн на ривулете приведены на рис. 11. Видно, что существуют как периодические волны, близкие по форме к синусу, так и волны типа солитонов. Интересно, что профили волн на рис. 11, а, в совершенно идентичны волнам на вертикально стекающей пленке жидкости. Два других типа волн являются новыми по сравнению с плоской пленкой.

Волновой режим на рис. 11, г представляет собой последовательность почти осесимметричных капель, медленно движущихся по нижней стороне слабонаклонного цилиндра. Основной механизм образования таких волн связан, по-видимому, с неустойчивостью Рэлея — Тейлора.

Волновой режим на рис. 11, б типичен для более высоких углов наклона ($\alpha \geq 15^\circ$) и более высоких расходов. Особенность этого режима — наличие двух горбов на гребне и

очень пологий задний фронт. Внешне эти волны похожи на Бюргеровский треугольник, наблюдавшийся на плоской пленке, напротив, при очень малых расходах [1].

Таким образом, в данной работе экспериментально описано ручейковое течение (ривулет) вдоль нижней стороны наклонного цилиндра при струйной подаче жидкости. Показано, что в исследованной области параметров величина смоченной поверхности цилиндра постоянна и не зависит от расхода. Приведены данные по толщине ривулета, волновым характеристикам и величине уноса жидкости за счет срыва капель со свободной поверхности. Обнаружены новые типы волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-02-04617).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Alekseenko S. V., Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G.** Wave Flow of Liquid Films. N. Y.: Begell House, 1994.
2. **Alekseenko S. V., Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G.** Wave formation in a vertically falling liquid film // AICHE J. 1985. V. 32. P. 1446–1460.
3. **Towell G. D., Rothfeld L. B.** Hydrodynamics of rivulet flow // AICHE J. 1966. V. 12, N 5. P. 972–980.
4. **Alekseenko S. V., Geshev P. I., Kuibin P. A.** Liquid flow on inclined cylinders // Proc. 2nd Int. Conf. on Multiphase Flow. Kyoto, 1995. V. 3. P. P4-13–P4-18.

*Поступила в редакцию 29/XII 1995 г.,
в окончательном варианте — 26/I 1996 г.*
