

УДК 532.517.2.013.4 : 532.612

© 1997 г. С.В. АЛЕКСЕЕНКО, Д.М. МАРКОВИЧ, С.И. ШТОРК

ВОЛНОВОЕ ТЕЧЕНИЕ РИВУЛЕТА ПО НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАКЛОННОГО ЦИЛИНДРА

Представлены результаты экспериментального исследования волнового движения ривулета (ручейка) по наружной поверхности наклонного цилиндра. Показано, что ручейковое течение неустойчиво, вследствие чего на поверхности ривулета развиваются нелинейные волны. Описаны различные типы поверхностных волн. Для детального изучения волновых характеристик применен метод наложенных колебаний. Обнаружены новые формы волнового движения по сравнению со случаем пленочного течения жидкостей.

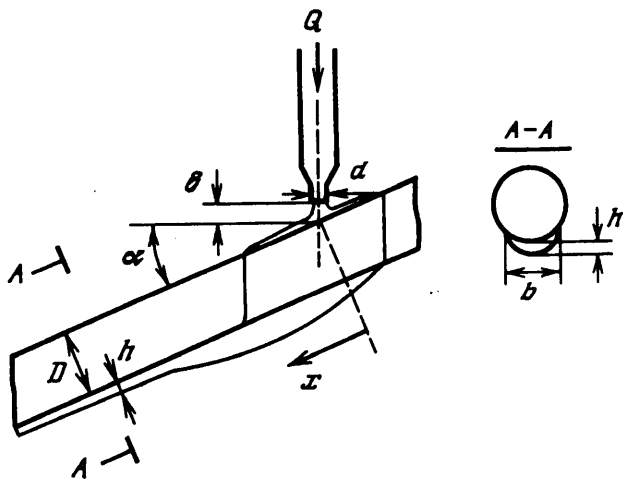
При струйном орошении наклонного цилиндра жидкость собирается на его нижней стороне и движется в виде так называемого ривулета (ручейка). Подобные режимы течения реализуются в недавно разработанных конденсаторах и теплообменниках с наклонными трубами. Такое оборудование перспективно, в частности, потому, что на наклонных трубах может реализовываться высокоинтенсивный режим капельной конденсации.

Одной из главных особенностей ручейкового течения жидкости снизу наклонного цилиндра является его неустойчивость, приводящая к образованию сильнонелинейных волновых режимов [1]. Как и в случае стекающих пленок жидкости [2], волны существенно влияют на гидродинамику ривулета и должны оказывать сильное воздействие на процессы теплопереноса. Сложность экспериментального изучения волнового движения ривулета связана с трудностью организации стабильного (в смысле постоянства характеристик) ручейкового течения. Из-за наличия контактной линии и соответственно гистерезиса контактного угла [3] ривулет обычно движется в виде неоднородной нестационарной извилистой змейки, вследствие чего невозможно получить приемлемые для физического анализа данные.

В литературе отсутствуют систематические исследования закономерностей ручейкового течения по наклонному цилиндру. Первые экспериментальные и теоретические результаты получены в [1] и [4] соответственно. В [1] экспериментально изучена гидродинамика ривулета при струйном орошении наклонного цилиндра диаметром 19 мм. Ривулет строго постоянной ширины удалось сформировать благодаря использованию стеклянной трубки с отшлифованной до матового состояния поверхностью, а также спирта в качестве рабочей жидкости. В зависимости от угла наклона цилиндра и расхода жидкости были измерены распределения толщины ривулета вдоль рабочего участка, длина гладкой зоны, унос жидкости. Показано постоянство ширины ривулета вне зависимости от расхода жидкости. Приведены примеры волновых режимов.

В [4] построена теоретическая модель безволнового ривулета. Получены точные и приближенные решения для профиля поперечного сечения. Развита метод расчета поля скоростей в двумерном потоке с произвольной комбинацией твердых и свободных границ. Сопоставление теории [4] и эксперимента [1] по ширине и толщине ривулета показало удовлетворительное согласие.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению волновых характеристик ривулета, движущегося по нижней стороне наклонного цилиндра. Основные результаты получены для возбужденных волн, генерируемых пульсациями расхода жидкости.



Фиг. 1. Схема эксперимента

Схема эксперимента изображена на фиг. 1. Рабочим участком является стеклянная трубка наружным диаметром $D = 19$ мм и длиной 1 м. Такие размеры характерны для теплообменного оборудования. Жидкость на рабочий участок подается в виде струи, истекающей из сужающегося сопла диаметром $d = 1-3$ мм. Расстояние δ от сопла до поверхности цилиндра менялось от 0 до 10 мм, а угол наклона цилиндра α – от 2 до 15°.

Как отмечено выше, с целью хорошего смачивания стеклянная трубка шлифовалась притирочными порошками так, чтобы получалась матовая поверхность, а в качестве рабочей жидкости использовался этиловый спирт. При $t = 20^\circ \text{C}$ плотность спирта $\rho = 805 \text{ кг/м}^3$, кинематическая вязкость $\nu = 1,49 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, кинематическое поверхностное натяжение $\sigma/\rho = 29,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}^2$.

В ходе эксперимента производилась видео- и фотосъемка картин течения, изменялись волновые характеристики и толщина ривулета. Локальная толщина ривулета h (фиг. 1) измерялась теньвым методом [2]. Его суть заключается в регистрации тени, отбрасываемой слоем жидкости при боковом освещении цилиндра. Смещение границы тени преобразовывалось в электрический сигнал посредством фотодиода. Толщина гладкого ривулета измерялась индикатором часового типа с ценой деления 1 или 10 мкм. Под толщиной ривулета подразумевается максимальная толщина жидкого слоя в поперечном сечении (фиг. 1).

Измерения волновых характеристик производились на расстояниях $x = 180, 335, 450$ мм в области гидродинамически стабилизированного течения [1] для углов наклона цилиндра $\alpha = 2, 5, 10, 15^\circ$. Расход жидкости менялся в пределах от 0,045 до 0,82 мл/с. Определим число Рейнольдса как $Re = Q/(bv)$, где Q – расход жидкости, b – ширина ривулета, и воспользуемся асимптотическими формулами [4]. Тогда при $\alpha = 10^\circ$ данным расходом жидкости будет соответствовать диапазон чисел $Re = 3,8 - 55,3$.

Как и в случае пленочных течений, на волнообразование в ривулете сильное влияние оказывают начальные возмущения. В связи с этим выделим понятия естественных и возбужденных волн [2]. Естественные волны образуются за счет гидродинамической неустойчивости течения в отсутствие начальных возмущений. При этом на начальной стадии развития возникающие волны достаточно хорошо описываются линейной теорией волн максимального роста [2], т.е. "выживают" возмущения, имеющие наибольшую скорость нарастания амплитуды. Важно отметить, что в этом случае волновые характеристики определяются только одним гидродинамическим параметром – расходом жидкости (числом Рейнольдса).

Для плоских или осесимметричных пленок жидкости вполне можно организовать

течение с минимумом возмущений на входе. Однако при формировании ручейкового течения область орошения, как видно из фиг. 1, сама по себе имеет сложную гидродинамическую структуру с собственными неустойчивостями. Возмущения на входе заметно снижаются при нулевом расстоянии δ между соплом и поверхностью цилиндра. При этом типичные профили волн для большинства режимов совершенно идентичны возмущениям толщины в тонких пленках жидкости. Это удивительный факт, учитывая, что поперечное сечение ривулета крайне неоднородно и представляет собой висющую каплю, в то время как стекающие пленки характеризуются постоянством толщины в трансверсальном направлении. Поэтому в дальнейшем при анализе волн на ривулете будем сравнивать их с пленочными волнами.

Из анализа осциллограмм пульсаций толщины ривулета вблизи линии волнообразования хорошо видна нестабильность процесса естественного волнообразования, следствием чего является большой разброс экспериментальных данных по волновым характеристикам. По этой причине, а также в связи с неопределенностью понятия естественных волн в данной работе применен метод наложенных колебаний, позволяющий получать волны с контролируемыми характеристиками. Сформированные таким образом волны были названы возбужденными волнами [2, 5]. Удобнее всего возбуждать волны пульсациями расхода жидкости, например путем периодического пережимания эластичной трубки, по которой подается жидкость на рабочий участок.

Возбужденные волны на стекающих тонких пленках жидкости были подробно изучены в [2, 5], а впоследствии – в [6, 7]. Как оказалось, основные свойства возбужденных волн на ривулете аналогичны свойствам возбужденных пленочных волн. Однако обнаружены и новые закономерности распространения волн, а также новые типы поверхностных волн. Эти результаты представлены ниже.

При наложении внешних возмущений (пульсаций расхода жидкости) конечной амплитуды на поверхности ривулета образуются строго регулярные стационарные волны. При этом картина волн определяется только частотой наложенных колебаний, но не зависит от их амплитуды. Этот факт означает существование однопараметрического семейства волновых режимов. Стационарные волны существуют в ограниченном диапазоне частот наложенных колебаний. Как и в случае тонких пленок [6], при высоких частотах регулярная картина волн разрушается за счет неустойчивости по отношению к боковой полосе частот (sideband instability), а при низких – вследствие субгармонической неустойчивости. Важно отметить, что при совпадении частот естественных и возбужденных волн волновые картины идентичны, т.е. естественные волны являются частным случаем семейства возбужденных волн.

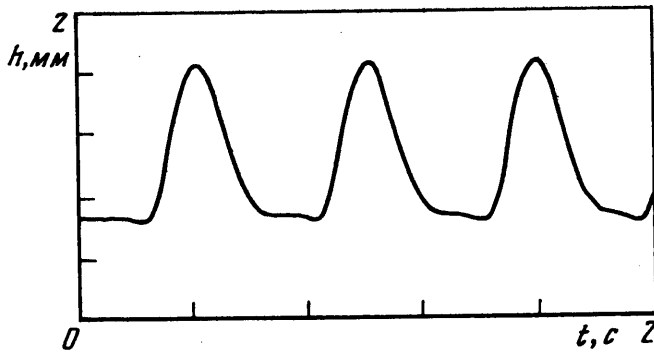
На фиг. 2 показана фотография ривулета снизу. Видно, что волны на ривулете в отличие от возбужденных волн на тонкой пленке трехмерные. Однако для условий эксперимента трансверсальный размер волны совпадает с шириной ривулета. Это является причиной того, что на ривулете удается наблюдать строго регулярные идентичные волны на всем протяжении рабочего участка (до 0,8 м) и в широком диапазоне расходов жидкости. В то же время для стекающих плоских пленок регулярные возбужденные волны существуют в весьма узких диапазонах по длине пробега и расходу [2]. Более того, на плоских пленках трехмерные волновые режимы являются нестационарными и стохастическими, а на ривулете трехмерное возмущение следует рассматривать как детерминированную двумерную волну, искаженную вследствие неоднородности поперечного сечения ривулета. Таким образом, ривулэт является удобным физическим объектом для изучения детерминированных волновых процессов.

На фиг. 3–5 изображены все характерные типы стационарных волн на ривулете в зависимости от угла наклона цилиндра α , расхода Q и частоты наложенных колебаний f .

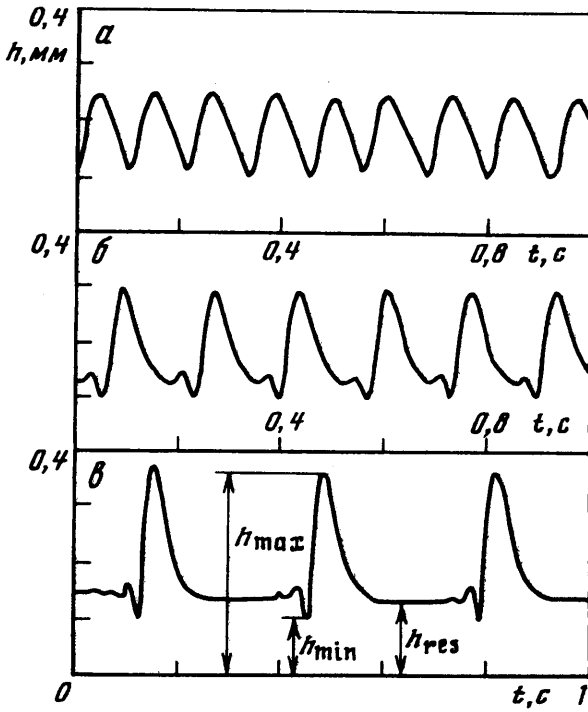
Рассмотрим вначале случай $\alpha = 15^\circ$, $Q = 0,09$ мл/с (фиг. 4), когда волны по форме наиболее близки к пленочным волнам. При высокой частоте возбуждения $f = 8,65$ Гц профиль волн близок к синусоидальному, а при низкой частоте $f = 3$ Гц волновой ре-



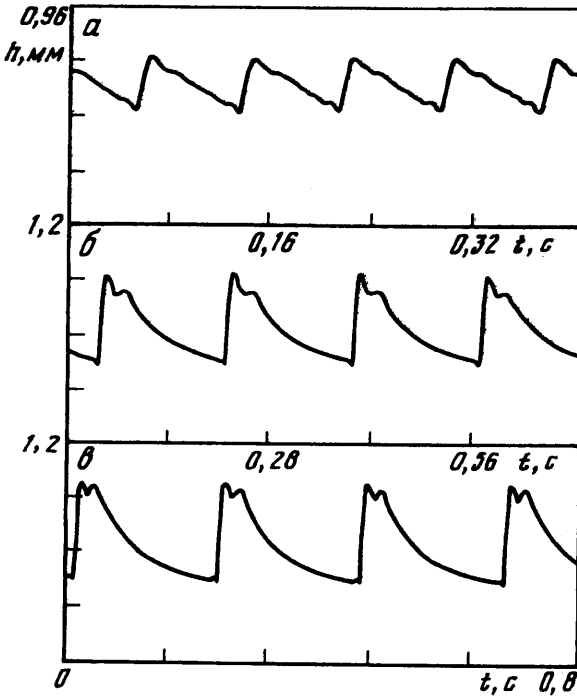
Фиг. 2. Фотография ривулета, вид снизу, $\alpha = 10^\circ$,
 $Q = 0,35$ мл/с



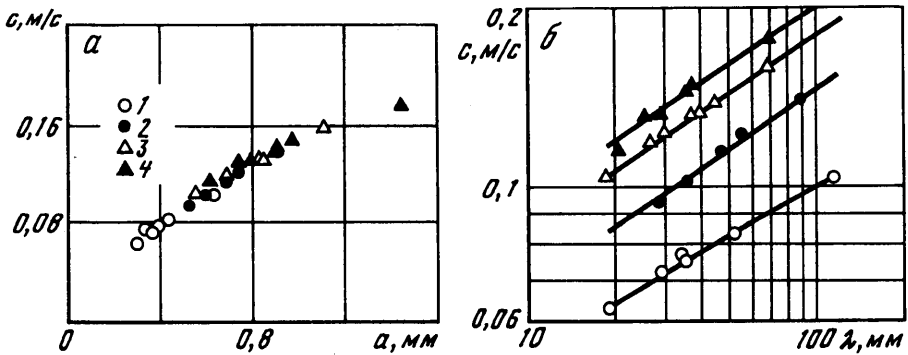
Фиг. 3. Стационарные естественные волны, $\alpha = 2^\circ$, $Q =$
 $= 0,09$ мл/с



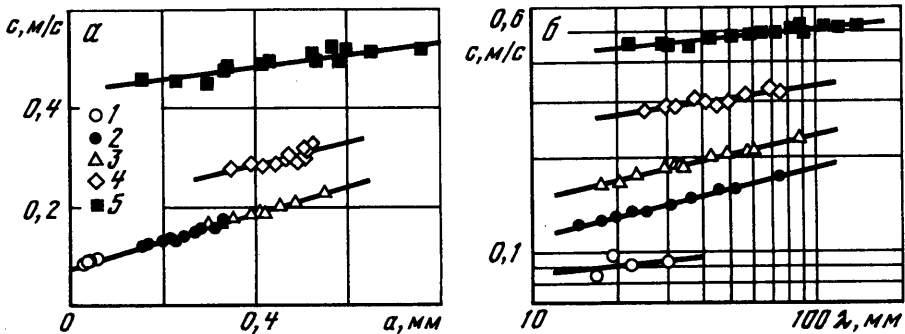
Фиг. 4. Профили стационарных возбужденных волн,
 $\alpha = 15^\circ$, $Q = 0,09$ мл/с: а - $f = 8,65$ Гц; б - 6,0; в - 3,0



Фиг. 5. Профили стационарных возбужденных волн,
 $\alpha = 15^\circ$, $Q = 0,82$ мл/с: а - $f = 12,3$ Гц; б - 5,7; в - 4,4



Фиг. 6. Фазовая скорость волн в зависимости от амплитуды (a) и длины волны (b); $\alpha = 5^\circ$, 1 - $Q = 0,05$ мл/с, 2 - 0,09, 3 - 0,14, 4 - 0,22



Фиг. 7. Фазовая скорость волн в зависимости от амплитуды (a) и длины волны (b); $\alpha = 15^\circ$, 1 - $Q = 0,05$ мл/с, 2 - 0,09, 3 - 0,14, 4 - 0,35, 5 - 0,82

жим представляет собой последовательность солитонов, бегущих по тонкому остаточному слою. Толщина остаточного слоя h_{res} является консервативной величиной и при заданном расходе Q слабо зависит от волновых параметров. Типичный солитон имеет вид крупноамплитудной одиночной волны с крутым передним фронтом и пологим задним. Впереди солитона наблюдается мелкомасштабная капиллярная рябь. Аналогичное описание волновых режимов справедливо для углов наклона $\alpha = 5$ и 10° . Для тонких пленок жидкости подобная картина нелинейных волн теоретически описана в [8, 9].

С уменьшением угла наклона цилиндра картина волн существенно меняется. Волны имеют форму осесимметричных висячих капель, медленно движущихся по непрерывному остаточному слою (фиг. 3). Очевидно, что основным механизмом неустойчивости здесь является неустойчивость Рэлея-Тейлора. На больших длинах пробега соседние волны взаимодействуют друг с другом, образуя более крупную каплю, которая обычно срывается с поверхности жидкого слоя.

Существенные изменения в волновой картине происходят и при увеличении угла наклона α в случае достаточно больших расходов жидкости. Пример стационарных возбужденных волн приведен на фиг. 5. Принципиальное отличие от волновых режимов, изображенных на фиг. 4, заключается в следующем. Во-первых, волны имеют треугольную форму с очень пологим задним фронтом. При этом во всех режимах отсутствует остаточный слой, несмотря на очень большую длину волн (до 150 мм). Во-вторых, волновой профиль является многогорбым (на фиг. 5 - двугорбым). Ввиду наличия столь явно выраженных признаков можно говорить о существовании новых семейств стационарных поверхностных волн в жидкостях.

Волновые характеристики стационарных волн приведены на фиг. 6 и 7 в виде зависимостей фазовой скорости c от амплитуды a и длины волны λ . Существование таких зависимостей означает наличие нелинейной дисперсии. Здесь амплитуда волн определена как разность между максимальным h_{\max} и минимальным h_{\min} значениями толщины (фиг. 4, в). Показано, что волновые режимы являются стационарными, поскольку характеристики волн не зависят от длины пробега x .

Проанализируем более подробно графики на фиг. 6. Из зависимостей $c(\lambda)$ следует, что связь между фазовой скоростью и длиной волны степенная: $c \sim \lambda^k$, но показатель степени k в отличие от случая пленочных волн зависит от расхода Q .

Примечательная особенность наблюдается для зависимостей $c(a)$. Как и для пленочных волн, эти зависимости линейные. Но при $\alpha = 5^\circ$ все экспериментальные точки ложатся на одну прямую вне зависимости от расхода жидкости Q . При $\alpha = 10$ и 15° в случае малых расходов точки также ложатся на одну линию вне зависимости от Q , но при высоких Q (0,35 и 0,82 мл/с) происходит сильное расслоение экспериментальных точек по расходу Q (фиг. 7). В то же время никаких особенностей не наблюдается в зависимостях $c(\lambda)$ и на осциллограммах профилей волн. Такое поведение экспериментальных данных еще требует своего объяснения, но, по-видимому, оно связано с переходом от одного семейства волн к другому.

Заключение. Впервые представлены экспериментальные данные по волнообразованию на ривулете (ручейке), движущемся по нижней стороне наклонного цилиндра. Показано, что ручейковое течение неустойчиво, следствием чего является образование нелинейных волновых режимов. С целью выяснения механизмов волнообразования применен метод наложенных колебаний. Показано, что возбужденные стационарные волны представляют собой однопараметрические семейства. При этом волновая картина полностью определяется частотой наложенных колебаний. Продемонстрировано наличие нелинейной дисперсии. Проведено сопоставление с пленочными волнами. Обнаружены новые типы волн, имеющих треугольную форму и двугорбый гребень.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-02-04617а) и Международного научного фонда (грант RPI 300).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alekseenko S.V., Licht W., Markovich D.M. et al. Rivulet flow on outer surface of an inclined cylinder // Proc. 2nd Intern. Conf. on Multiphase Flow. 1995. V. 1. P. IP1-35-IP1-39.
2. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Wave flow of liquid films. N.Y.: Begell House, 1994. 335 p.
3. Towell G.D., Rothfeld L.B. Hydrodynamics of rivulet flow // AIChE Journal. 1966. V. 12. № 5. P. 972-980.
4. Alekseenko S.V., Geshev P.I., Kuibin P.A. Liquid flow on inclined cylinders // Proc. 2nd Intern. Conf. on Multiphase Flow. 1995. V. 3. P. P4-13 - P4-18.
5. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.Ye., Pokusaev B.G. Wave formation on a vertically falling liquid film // AIChE Journal. 1985. V. 31. № 9. P. 1446-1460.
6. Liu J., Gollub J.P. Onset of spatially chaotic waves on flowing films // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. № 15. P. 2289-2292.
7. Liu J., Gollub J.P. Solitary wave dynamics of film flows // Phys. Fluids. A. 1994. V. 6. № 5. P. 1702-1712.
8. Демехин Е.А., Шкадов В.Я. Режимы двумерных волн тонкого слоя вязкой жидкости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 3. С. 63-67.
9. Трифонов Ю.Я., Цвелодуб О.Ю. Нелинейные волны на поверхности жидкости, стекающей по вертикальной стенке // ПМТФ. 1985. № 5. С. 15-19.