

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

В. М. Козлов

(Москва)

Проведено экспериментальное исследование волновых явлений на поверхности пленки жидкости, свободно стекающей по стенкам вертикального канала, в диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения ($Re = \Gamma/\eta = 50 \div 2500$, где Γ — весовая плотность орошения; η — динамическая вязкость) на различных расстояниях от входа. Рабочая жидкость (вода) подавалась на рабочий участок при температуре $15 \div 30^\circ\text{C}$. Получены зависимости характерных волновых параметров от режимных параметров.

Стекание пленки жидкости по вертикальной поверхности сопровождается возникновением и развитием неупорядоченного волнового движения. В реальных условиях при $Re \leq 2 \div 5$ и на незначительных расстояниях от входа на поверхности пленки, подвергшейся случайному возмущению, возникают волны достаточно произвольной формы и частоты, причем по мере стекания пленки жидкости заметно значительное развитие волнового движения. Это приводит к тому, что амплитуда волн даже при небольших плотностях орошения, но на достаточном удалении от входа становится не только соизмеримой со средней толщиной, но и значительно превосходит ее. На интенсификацию волнового движения по длине канала указывают многие авторы, проводившие изучение гравитационного течения пленки жидкости на экспериментальных стендах с короткими рабочими участками $L \leq 3$. При этом даже в ламинарно-волновой области течения ($1 \div 6 \leq Re \leq 200 \div 500$) в экспериментах не наблюдалось насыщение волновых возмущений на поверхности пленки жидкости по всей длине канала. Сведения о характере гравитационного течения пленки жидкости по поверхности каналов длиной более $3 \div 4$ м отсутствуют [1]. Между тем развитие энергетики, химического и холодильного машиностроения, опреснение соленых вод требуют применения каналов большой длины. Расчет теплообменных аппаратов большой производительности в настоящее время представляет значительные трудности, поскольку остается совершенно невыясненной физическая картина течения.

В данной работе проведено экспериментальное исследование природы волновых явлений на поверхности пленки жидкости, стекающей по стенкам канала большой длины, в достаточно широком диапазоне изменения плотностей орошения ($Re = 50 \div 2500$) на установке, описанной ранее [1].

Для исследования волновых возмущений применены емкостный метод измерения и прямое фотографирование [1–3]. Емкостный метод измерения дает возможность фиксации мгновенных толщин пленок жидкости. В результате обработки осциллографической записи получают как среднюю толщину, так и характерные волновые параметры ($\bar{\delta}$ — средняя толщина; δ_* — средняя толщина пристенного слоя; δ^* — средняя высота выступов; ω — частота волновых возмущений). Для определения профиля волн использовался метод прямого фотографирования.

Первые волновые возмущения на поверхности жидкости появляются непосредственно за входным устройством и представляют собой рябь с малыми амплитудами и различной длиной волн. С увеличением расстояния от входа амплитуда волн возрастает, стремясь к постоянному для

данной плотности орошения значению. Участок стабилизации волновых возмущений зависит от плотности орошения и длины пробега пленки.

Форма волновых возмущений изменяется достаточно сильным образом при свободном стекании слоя жидкости по вертикальной поверхности. На начальном участке для всех экспериментальных значений плотности орошения возмущения имеют вид ряби; с увеличением расстояния от входа появляются единичные крупные волны, имеющие вполне определенную амплитуду, длину волны и характерную частоту.

Важной величиной, характеризующей волновое движение пленки жидкости, является амплитуда волн. Следует заметить, что до настоящего времени не выработано единого критерия для оценки амплитудной структуры процесса. Так, в [4-6] за характерную амплитуду принимаются локальные значения толщины пленок в наивысших гребнях волн. В работах [3,7] условное значение амплитуды вычисляется как отношение величины выступа на осциллограмме относительно линии средней толщины к средней толщине пленки.

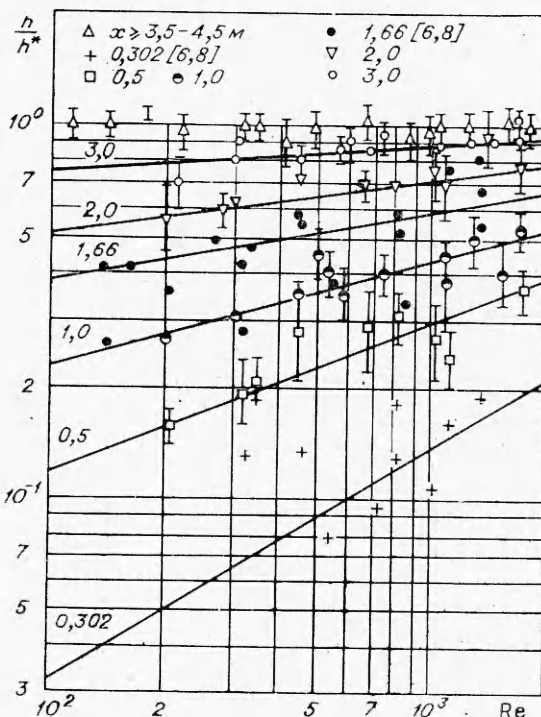
Очевидно, более представительной будет не высота наивысших гребней волн и не условная амплитуда, а величина, учитывающая реальную глубину возмущений волновой поверхности. Этой величиной является средняя высота волновых возмущений ($h = \delta^* - \delta_*$).

В исследованном диапазоне плотностей орошения средняя высота возмущений увеличивается на начальном участке ($x \leq 3,5 \div 4,5$) и далее остается практически неизменной для данной плотности орошения.

Высота предельных волновых возмущений определяется соотношением критерия Галилея возмущений ($Ga = h^* g \nu^{-2}$), учитывающего влияние силы тяжести на гравитационное волновое движение, и критерия Рейнольдса осредненного движения ($Re = \Gamma/\eta$):

$$(1) \quad (Ga)_h^* = 106 Re^{0,822}.$$

Высота волновых возмущений существенным образом зависит не только от плотности орошения, но и от длины пробега пленки (x). На фиг. 1 представлено изменение высоты волновых возмущений в зависимости от длины пробега и числа Re в координатах $[h/h^*, Re]$ для $x = 0,5; 1,0; 2,0; 3,0$. Экспериментальные значения высоты волновых возмущений сопровождаются дисперсией высоты волны, полученной из опыта. Здесь же даны экспериментальные значения h , полученные в [6,8]. Большой разброс следует объяснить меньшим массивом усредняемых точек, на графике представлены отдельные реализации процесса.



Фиг. 1

Как следует из фиг. 1, увеличение длины пробега приводит к возрастанию волновых возмущений. Скорость увеличения высоты возмущений постепенно замедляется, и на расстояниях $3,5 \div 4,5$ м высота возмущений $h=h^*$.

Поведение на начальном участке ($0,3 \leq x \leq 3,5 \div 4,5$) в зависимости от длины пробега и числа Re может быть описано зависимостью вида

$$h/h^* = A Re^n, \text{ где } A = 6,7 \cdot 10^{-2} \cdot x^{1,95}; \quad n = \exp[-(0,66x + 0,635)],$$

при $x \geq 3,5 \div 4,5$ м справедлива зависимость (1).

Как уже указывалось выше, постановка эксперимента и интерпретация известных опытных данных, имеющихся в литературе до настоящего времени, совершенно не дают возможности последовательного и полного описания картины течения. В последних работах [3,8,9] анализ экспериментальных данных ограничивается оценкой некоторых осредненных величин.

Поэтому частоту следует определять через спектральную плотность мощности случайного процесса, которая описывает общую частотную структуру процесса через спектральную плотность среднего значения квадрата мгновенных толщин:

$$S(\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{(\Delta\omega)T} \int_0^T \delta^2(t, \omega, \Delta\omega) dt,$$

где ω — частота процесса; $\Delta\omega$ — интервал квантования по частоте; T — время реализации волнового процесса.

Толщина пленки определяется через плотность распределения случайного процесса, устанавливающую вероятностные законы поведения мгновенной толщины в зависимости от определяющих параметров:

$$P(\delta) = \lim_{\Delta\delta \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \left(\frac{n_i}{\Delta\delta} \right),$$

где $\Delta\delta$ — интервал квантования по толщине; N — объем выборки случайного процесса; n_i — число реализаций в данном интервале по толщине.

Сравнение экспериментальных кривых плотностей распределения мгновенной толщины (кривые 1, фиг. 2) показывает, что основной вклад плотности распределения может быть описан функцией

$$\varphi = \frac{1}{2^{m/2} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} \left(\frac{\delta}{\sqrt{\frac{v^2}{g}}} \right)^{\frac{m-2}{2}} \exp - \frac{\delta^2}{2 \sqrt{\frac{v^2}{g}}}, \quad m = \bar{\delta}^3 \sqrt{\frac{v^2}{g}} + 2;$$

$\Gamma\left(\frac{m}{2}\right)$ — гамма-функция.

Функция φ является плотностью распределения величины χ^2 , которая определяется как сумма квадратов случайных величин, каждая из которых распределена нормально с нулевым средним значением и единичной дисперсией

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{\delta \sqrt{\frac{v^2}{g}} - \bar{\delta} \sqrt{\frac{v^2}{g}}}{\sigma} \right)^2 = \chi^2.$$

Функция φ является частным случаем более общего теоретического (Γ) гамма-распределения.

Как следует из фиг. 2 ($Re=600$, $x=var$), функция φ (кривые 3) не учитывает увеличение асимметрии процесса за счет увеличения вклада волн большой высоты ($>\delta$) с развитием волнового движения по длине канала. Заметное отклонение от φ -распределения наблюдается в начальных сечениях канала, где волновое движение еще недостаточно развито и вклад значений мгновенной толщины, близких к средним, достаточно велик. Сопоставление кривых распределения показывает также, что закон нормального распределения (кривая 2 — распределение Гаусса) при данной дисперсии процесса не может применяться для описания вероятностной структуры процесса.

Для выяснения механизма волнового течения пленки необходимо знать зависимость наиболее характерной частоты процесса (ω^* — положение максимума спектральной плотности) от определяющих параметров течения: плотности орошения и длины пробега пленки. Анализ поведения величины ω^* в зависимости от числа Re и x показал, что для каждой плотности орошения есть свое вполне определенное значение частоты насыщения волнового движения ω^{**} , которого несущая частота ω^* достигает на расстояниях $3,5 \div 4,5$ м от входа, оставаясь неизменной далее по длине канала.

Зависимость ω^{**} от числа Re представлена на фиг. 3 и описывается выражением

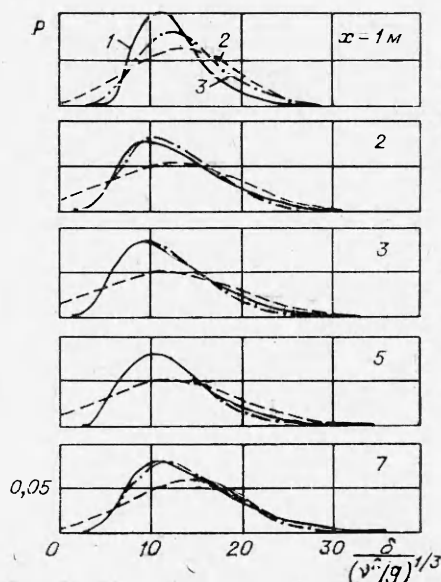
$$\omega^*/\omega^{**} = \exp(-ax+b),$$

$$a = \exp(4,1810^{-4}Re - 2,73),$$

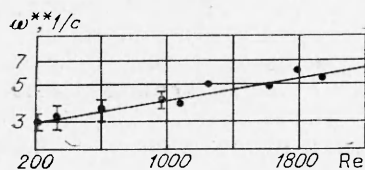
$$b = \exp(6,44 \cdot 10^{-4}Re - 1,562).$$

Изменение несущей частоты ω^* в зависимости от длины пробега и числа Рейнольдса (индекс кривой соответствует числу Re) показано на фиг. 4. Как видно из представленных графиков, зависимости $8 \div 11$ достаточно хорошо описывают поведение по всей длине канала.

Увеличение плотности орошения и длины пробега пленки жидкости интенсифицирует волновое движение на свободной поверхности. Развитие волновых возмущений приводит, в конце концов, к срыву



Фиг. 2



Фиг. 3

жидкости с поверхности пленки [1]. В данной работе предпринята попытка предотвращения срыва путем разрушения крупных волн с помощью устройства, состоящего из ряда продольно-омываемых пластинчатых ребер.

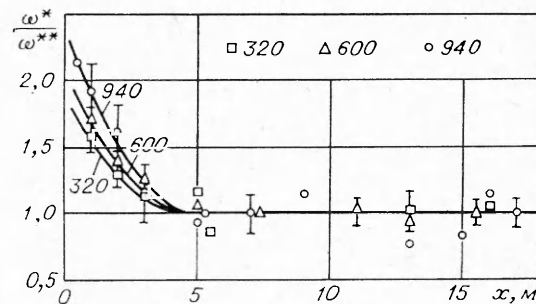
Набегающий поток жидкости проходил через ряд ребер, при этом существенно изменялась первоначальная волновая структура потока за счет разрушения крупных волн и интенсивного перемешивания жидкости при прохождении ее через межреберное пространство.

В литературе совершенно отсутствуют сведения по взаимодействию набегающего волнового потока с преградой, поэтому рассмотрение такого

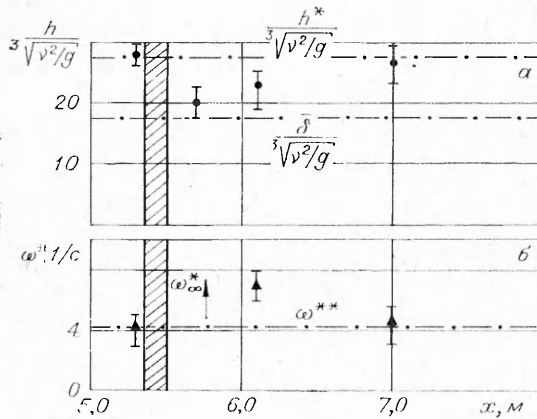
взаимодействия представляет большой интерес не только с точки зрения получения «квазиплоской» пленки, но и как первая попытка экспериментального изучения подобного рода взаимодействия.

Устройство состояло из ребер, изготовленных из латунной фольги толщиной 0,1 мм. Высота ребра (h) была значительно больше (максимальной) амплитуды волн (δ). Длина ребра должна значительно превосходить длину волны на поверхности пленки жидкости.

Предварительный эксперимент с 12, 24, 36 ребрами показал, что наиболее эффективным является устройство с 24 ребрами. Устройство устанавливалось на расстоянии 5,5 м от входа, т. е. в области, где уже произошло насыщение волнового движения. Измерение мгновенной толщины производилось емкостным методом [1] до устройства ($x=5,3$) и после устройства на расстояниях 0,2; 0,7; 1,5 м от него (расстояния от входа 5,7; 6,2; 7,0 м).



Фиг. 4



Фиг. 5

Изменения характерных волновых параметров за счет прохождения жидкости через преграду представлены на фиг. 5 (плотность орошения $Re=850$). Глубина волновых возмущений (фиг. 5, а) $h/\sqrt{v^2/g}$ изменяется от величины насыщения (сечение $x=5,3$ м) до величины, близкой к средней толщине сразу после успокоителя за счет сглаживающего воздействия устройства. С увеличением расстояния вниз по потоку происходит восстановление структуры волновых возмущений и на расстоянии $x=7,0$ м близко по своему значению к установившемуся.

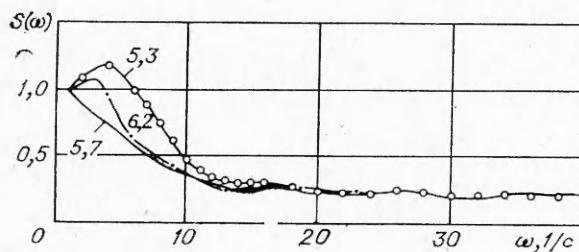
Энергетический спектр волнового движения при прохождении через преграду претерпевает изменения таким образом, что происходит перестройка спектра с характерной частотой насыщения до устройства ω^{**}

в спектр, характерный для экспоненциального шума с корреляционной функцией вида $R(\tau) = e^{-a|\tau|}$.

В этом случае в спектре нет преобладающей гармоники (на фиг. 6 представлены сглаженные с помощью окон Бартлетта нормированные спектры для $Re = 850$, индекс кривой соответствует расстоянию от входного устройства), и наблюдается течение квазиплоской пленки с амплитудой, близкой к средней толщине, и со спектром частот экспоненциального шума $S(\omega) = 1,160\omega^{-0,0504}$.

Таким образом, введение в поток внешних возмущений, распространяющихся по всей толщине пленки жидкости, приводит к эффекту «выбеливания» энергетического спектра волнового движения.

Автор приносит благодарность Б. Г. Ганчеву за полезные обсуждения результатов этой работы.



Фиг. 6

Поступила 3 VI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Ганчев Б. Г., Козлов В. М. Исследование гравитационного течения пленки жидкости по стенкам вертикального канала большой длины. — ПМТФ, 1973, № 1.
2. Капица П. Л., Капица С. П. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости. — ЖЭТФ, 1949, вып. 19, № 1.
3. Роговая И. А., Олевский В. М., Рунова Н. Г. Измерение параметров волнового течения на вертикальной пластине. — ТОХТ, 1969, т. 3, № 2.
4. Brauer H. Strömung und Wärmeübergang bei Beiselfilmen. — «V. D. I. Forschungsheft», 1956, H. 457, S. 19.
5. Воронцов Е. Г. Особенности волнового течения с изменением длины пробега пленки. — «Инж.-физ. журн.», 1969, т. 16, № 1.
6. Ганчев Б. Г., Козлов В. М., Лозовецкий В. В., Никитин В. М. Экспериментальное исследование гидродинамики пленок жидкости, стекающих под действием силы тяжести по вертикальным поверхностям. — «Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение», 1970, № 2.
7. Шкадов В. Я., Холпанов Л. П., Малюсов В. А., Жаворонков Н. М. К нелинейной теории волновых течений пленки жидкости. — ТОХТ, 1970, т. 4, № 6.
8. Ганчев Б. Г., Козлов В. М., Лозовецкий В. В. Исследование нисходящего течения пленки жидкости по вертикальной поверхности и теплопереноса к ней. — «Инж.-физ. журн.», 1971, т. 20, № 4.
9. Роговая И. А., Олевский В. М., Рунова Н. Г. Влияние физических свойств некоторых жидкостей на параметры волнового течения пленки. — ТОХТ, 1973, т. 7, № 5.