

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНОК ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТРОБОСКОПИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Б. Г. Ганчев, В. М. Козлов, В. В. Орлов

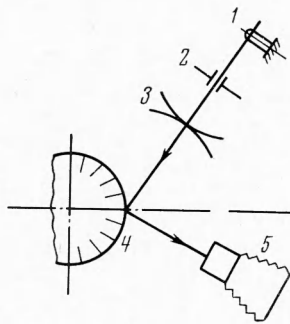
(Москва — Новосибирск)

Рассматриваются особенности и возможность применения метода стробоскопической визуализации при изучении течения тонких пленок жидкости.

Экспериментально исследованы поля скоростей и турбулентных пульсаций в диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения жидкости  $R = 40 \div 1770$ .

Экспериментальное изучение кинематических характеристик пленок жидкости обладает рядом особенностей. Прежде всего измерения проводятся в тонком пристенном слое, внесение в который даже самых малых по размерам неподвижных датчиков скорости, например нити термоанемометра или насадка трубки Пито, может привести к существенным изменениям в структуре потока, потому что размеры датчика скорости соизмеримы с линейными размерами потока.

Использование термоанемометра для изучения течения в тонких слоях жидкости нельзя считать эффективным, так как для измерения вблизи стенки, а особенно внутри вязкого подслоя, требуются нити размером до одного микрона. Изготовление и обеспечение стабильности показаний таких датчиков — сложная задача. Эта задача усложняется наличием свободной, волновой поверхности пленки жидкости [1, 2]. Предъявляются повышенные требования к чистоте всего замкнутого контура экспериментальной установки, поскольку «качество» нити сильно зависит от состояния ее поверхности. Предпринятые ранее попытки использования термоанемометра ограничились исследованием только осредненных значений продольной составляющей скорости и только в пределах непрерывного пристенного слоя. При этом диаметр нити составлял десять микрон, что не могло не сказаться на точности исследований [1]. При измерении



Фиг. 1

в тонком пристенном слое необходимо учитывать влияние стенки на показания прибора, причем это влияние существенно и во многих случаях определение необходимой поправки затруднено [3, 4].

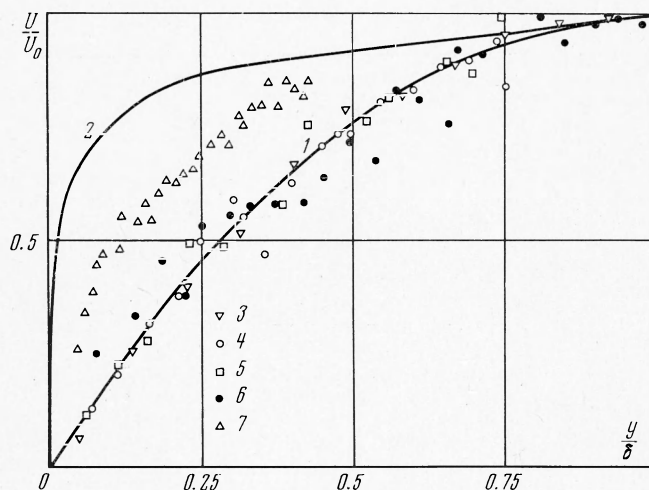
В связи с этим особый интерес представляют методы визуализации [5-7].

В данной работе для исследования структуры потока в стекающей пленке жидкости используется метод стробоскопической визуализации [6] с использованием генератора цуга световых вспышек большой яркости [8]. Суть метода заключается в фотографировании введенных в поток мелких отражающих или рассеивающих свет частиц при импульсном боковом освещении. Размер частиц должен быть меньше масштаба изучаемого явления, т. е. меньше размеров наименьшего вихря, который может существовать в потоке. Время реакции частицы на мгновенное изменение характера течения в потоке должно быть меньше, чем наименьший временной масштаб течения. В качестве «меток» в данной работе использовались сферические частицы алюминия размером  $2 \div 10$  мк. Серия вспышек импульсной лампы дает на фотопленке ряд изображений одной и той же частицы. Расстояние между двумя соседними изображениями дает возможность определить две компоненты вектора мгновенной скорости  $u_x$ ,  $u_y$  (компоненты  $x$  и  $y$  отсчитываются, соответственно, вдоль и перпендикулярно течению). Система измерений состоит из электронного стробоскопа [8] и оптической схемы измерений (фиг. 1), которая содержит источник света — импульсную лампу 1, оптическую цель 2, светосильный объектив — конденсор 3, отражающую зеркальную поверхность рабочего участка 4. Пучок параллельных лучей от источника света высвечивает в жидкости область, равную по высоте  $5 \div 8$  мм и по периметру порядка 3 мм. В ту же область сфокусирован фотоаппарат 5, оптическая ось которого наклонена под некоторым углом  $i$  к нормали от зеркальной поверхности. В результате контрольных опытов было найдено оптимальное значение угла  $i = 30 \div 40^\circ$ . Фотоаппарат снабжен насадкой, обеспечивающей нужное увеличение.

Применение методов визуализации при изучении пленочных течений осложнено трудностями координирования относительно твердой поверхности. В отличие от течения в плоском прозрачном канале [6] здесь нет реперной метки, нанесенной на дно канала, которая бы экспонировалась на фотопленку. Задача усложняется также нали-

нием свободной поверхности, которая в подавляющем большинстве случаев имеет волновой характер [1, 2]. В ряде работ [9, 10] вообще не производилось координирования, а полученные значения мгновенной скорости обрабатывались в предположении равномерного распределения частиц в жидкой пленке и в предположении, что профиль скорости представлял собой монотонную кривую. Однако эксперимент показывает [11], что даже в случае обеспечения равномерности концентрации частиц на входе распределение частиц в потоке заметно отличается от равномерного.

Предположение о монотонности профиля скорости также вызывает возражения, поскольку можно предположить только монотонность профиля средней скорости. В работе [12] использован оптико-механический метод координирования, заключающийся в том, что короткофокусный объектив, обладающий очень малой глубиной рез-



Фиг. 2

кости (3÷5 мкм), перемещается в плоскости, перпендикулярной омываемой поверхности. При этом последовательно высвечиваются и фотографируются все сечения вплоть до стенки. В этом случае получаемая информация весьма ограничена, так как при каждом отдельном измерении высвечивается и фотографируется очень узкая область и велика вероятность того, что в этой области может не оказаться ни одной частицы. В лучшем случае фактическая информация ограничивается мгновенными значениями продольной составляющей скорости. Кроме того, предъявляются весьма высокие требования к точности изготовления механизма перемещения объектива.

В данной работе использовался оптический метод координирования. Если поверхность рабочего участка, по которому течет пленка жидкости, оптически зеркальна, то каждая, попавшая в кадр частица, будет иметь как действительное, так и мнимое изображение. На фотоматериале будем иметь «двойной» трек частицы. Действительное и мнимое изображения частицы симметричны относительно зеркальной поверхности и равноудалены от нее. Расстояние частицы от стенки можно выразить через соответствующие координаты крайних изображений трека.  $\xi_1, \xi_2$  — крайние действительные координаты трека;  $\eta_1, \eta_2$  — крайние мнимые координаты трека.

$$y = [(\xi_1 - \eta_1) + (\xi_2 - \eta_2)]^2$$

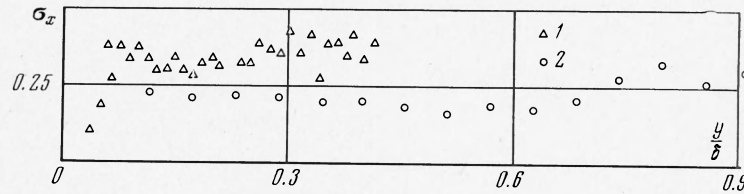
При расшифровке треков частиц необходимо учитывать, что оптическая ось фотоаппарата расположена не перпендикулярно омываемой поверхности, а под некоторым углом  $i$ . Поскольку объект съемки, «датчик скорости» помещен в среду с коэффициентом преломления  $n > 1$ , а фотообъектив расположен в воздушной среде  $n = 1$ , необходимо учитывать преломление лучей падающего и отраженного света на границе двух сред. С учетом отражения и преломления и увеличения объектива с насадкой  $N$  связь между действительным расстоянием до стенки и величиной фиксируемой на фотоматериале можно записать в виде

$$y = \frac{(\xi_1 - \eta_1) + (\xi_2 - \eta_2)}{4N \sin i \sqrt{1 + (1 - n_1^2/n_2^2) \operatorname{tg}^2 i}} \quad (2)$$

Исследование структуры потока производилось на установке, рабочим участком которой является вертикальный цилиндрический канал длиной 1000 мм и диаметром

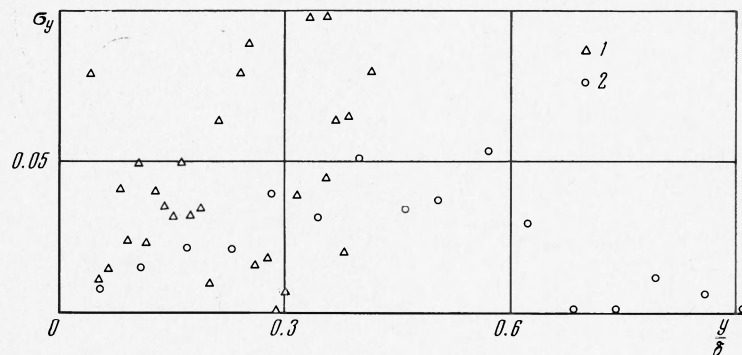
43 мм, изготовленный из стали X18H10T. Внешняя поверхность рабочего участка тщательно полировалась до состояния оптически зеркальной поверхности. Рабочая жидкость, дистиллят, из бачка с постоянным свободным уровнем через щелевой распределитель подавалась на внешнюю поверхность рабочего участка.

Проведено исследование полей скорости и турбулентных пульсаций в сечении, отстоящем на расстоянии 530 мм от входа, при температуре орошающей жидкости



Фиг. 3

$t = 23 \pm 28^\circ \text{C}$  и плотностях орошения  $\Gamma = 0,03 \div 1,5 \text{ кг/м} \cdot \text{сек}$ . Таким образом, была исследована область чисел Рейнольдса пленочного течения жидкости, определенных по толщине пленки и ее скорости  $R = 40 \div 1800$ , т. е. ламинарно-волновой и турбулентный режимы течения пленки жидкости [2]. На фиг. 2 представлены профили средней скорости пленки, обработанные в безразмерном виде. Расстояние до стенки нормируется через толщину пленки  $\delta$ , определенную через массовый расход и экспериментальный профиль скорости.



Фиг. 4

Сплошными линиями представлены квадратичное распределение скорости для ламинарного режима течения (1) и степенное распределение с показателем степени  $1/7$  для турбулентного режима (2). Как видно из графиков, при малых интенсивностях орошения ( $R = 40, 60, 140$ ; точки 3, 4, 5 на фиг. 2) наблюдается достаточно хорошее совпадение с параболическим распределением скорости. Следовательно, несмотря на наличие волнового движения на поверхности пленки, осредненное течение ее является фактически ламинарным. Волновые явления на поверхности можно сравнивать с перемежаемостью внешней границы пограничного слоя, когда профиль средней скорости остается монотонным. С увеличением интенсивности орошения ( $R > 200$ ; точки 6, 7) происходит расслоение профилей скорости, градиент скорости у стенки растет, заполненность профиля увеличивается, происходит постепенный переход от ламинарно-волнового режима течения к турбулентно-волновому. Однако даже при наибольшей интенсивности орошения ( $R = 1770$ ; точки 7) профиль скорости все еще значительно отличается от профиля развитого турбулентного течения, построенного по закону  $1/7$  (кривая 2).

Проведено исследование двух компонент интенсивности пульсации скорости  $u_x'$ ,  $u_y'$ . На фиг. 3, 4 представлены среднеквадратичные значения этих величин, отнесенные к среднерасходной скорости  $\sigma_x = \sqrt{\bar{u}^{12}/\bar{u}_x}$ ,  $\sigma_y = \sqrt{\bar{u}_y^{12}/\bar{u}_x}$  для двух режимов  $R = 60$  и  $1770$  (точки 2 и 1 на фиг. 3, 4 соответственно).

Прежде всего следует отметить наличие достаточно больших продольных пульсаций скорости при всех режимах течения пленки, в том числе и при малых плотностях орошения. Поперечные пульсации также зарегистрированы на всех режимах течения, но интенсивность их значительно ниже, чем продольных, и лишь при наибольших исследованных плотностях орошения приближается к уровню продольных пульсаций.

При малых плотностях орошения, соответствующих квадратичному распределению осредненной скорости, поперечные пульсации на порядок меньше продольных, величина их несколько увеличивается в направлении от стенки.

Для продольных и поперечных пульсаций просматривается отчетливая тенденция к увеличению с возрастанием плотности орошения. Поперечные пульсации увеличиваются быстрее.

Поступила 3 VIII 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ганчев Б. Г., Козлов В. М., Лозовецкий В. В., Никитин В. М. Экспериментальное исследование гидродинамики пленок жидкости, стекающей под действием силы тяжести по вертикальной поверхности. Изв. вузов, Машиностроение, 1970, № 2.
2. Капица П. Л., Капица С. П. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости. ЖЭТФ, 1949, т. 19, вып. 2.
3. Демин В. С., Куряев А. А. Экспериментальное исследование влияния стенки на показания термоанемометра. Изв. СО АН СССР, 1969, № 3, вып. 1.
4. Wills A. V. The correction of hot-wire readings for proximity to a solid boundary. J. Fluid Mech., 1962, vol. 12, pt 3.
5. Трохан А. М. Измерение скорости газовых потоков кинематическими методами. ПМТФ, 1962, № 2.
6. Орлов В. В. Экспериментальное изучение пристенной турбулентности в канале. ПМТФ, 1966, № 4.
7. Ринкевичюс Б. С. Измерение локальных скоростей в потоке жидкости и газа по эффекту Доплера. Теплофизика высоких температур, 1970, № 5.
8. Орлов В. В., Федорук Ю. М. Генератор дуга световых вспышек большой яркости для гидродинамических исследований. Теплофизика высоких температур, 1968, № 4.
9. Kinney G., Abramson A., Sloop J. Internal — liquid — film — cooling experiments with airstream temperatures to 2000° F in 2 — and 4 — inch — diameter horizontal tubes. NASA Rept, 1952, No. 1087.
10. Перссон С. Метод определения распределения скорости в тонкой жидкой пленке. Ракетная техника и космонавтика, 1964, № 2.
11. Jeffrey R. C., Pearson J. R. A. Particle motion in laminar vertical tube flow. J. Fluid. Mech., 1965, vol. 22, pt 4, pp. 721—735.
12. McPherson G. D., Murgatroyd W. Film breakdown and dryout in twophase annular flow. Proc. 3rd Internat. Heat Trans. Conf. Chicago, 1966, vol. 3. New York, Amer. Inst. Chem. Engrs, 1966.

Технический редактор Э. Ф. Бунова

Сдано в набор 2-III-1972 г. Т-06357 Подписано к печати 30/III-1972 г. Тираж 2055 экз.  
Зак. 130 Формат бумаги 70×108/16 Усл. печ. л. 12,6 Бум. л. 4 1/2 Уч.-изд. листов 12,7

2-я типография издательства «Наука». Москва, Шубинский пер., 10