

УДК 532.592

© 2004 г. В. А. КАЛИНИЧЕНКО

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

Экспериментально исследована кинематическая структура течения двухфазной среды при взаимодействии воздушного потока с первоначально покоящимся или движущимся слоем воды в прямоугольном канале. Методами лазерной диагностики и термоанемометрии получены распределения скоростей водной и воздушной сред для расслоенного режима течения.

Ключевые слова: воздушно-водяной поток, термоанемометр, лазерный доплеровский анемометр, дрейфовое и возвратное течения, профиль скорости

Проблемы, включающие воздействие воздушного потока на слой жидкости, первоначально покоящийся или движущийся, являются общими для инженерной практики и геофизических приложений [1, 2]. Существующие теоретические модели не способны дать детальное количественное описание механизмов дрейфового течения и волнообразования и в основном базируются на эмпирических данных. По существу все ранние модели генерации волн ветром [3, 4] и современные теории формирования ветровых волн на течении (см. детальный обзор в [5]) содержат эмпирически определяемые коэффициенты. В связи с этим ключевую роль в изучении двухфазных течений играет эксперимент.

Представленные ниже результаты лабораторного исследования горизонтального двухфазного потока получены с целью детализации структуры течений в слоях воздуха и воды. Аналогичные измерения скорости проводились в [6–13], однако поле скорости оценивалось или в воде [6, 7, 11–13], или в воздухе [8–10]. В настоящей работе определены кинематические характеристики двух сред в режимах расслоенного течения или начального волнообразования, когда взаимодействие двух потоков скывается на форме профилей скорости.

1. Постановка эксперимента. Измерения проводились в закрытом сверху прямоугольном канале, имеющем поперечное сечение 54×54 мм и длину рабочего участка 2.2 м. Воздушный поток над водой создавался с помощью вентиляторной установки, регулятор давления позволял устанавливать скорость потока воздуха в диапазоне от 0.5 до 10 м/с. Циркулирующая по замкнутому контуру вода через ротаметры направлялась в канал, причем скорость (0–0.3 м/с) и глубина потока регулировались изменением расхода и положением водосливного затвора. Для снижения уровня возмущений границы воздух–вода во входном сечении канала имелась смесительная камера с разделительной горизонтальной пластиной. В ходе экспериментов изменение уровня воды на длине канала оценивалось как 1–2 мм и при обработке результатов не учитывалось, так как длина рабочего участка превышала эту величину в 10^3 и более раз.

Измерения скорости проводились в вертикальной осевой плоскости канала на расстоянии $x = 140$ см от входного сечения. Кинематические характеристики потока жидкости измерялись с помощью стандартного лазерного доплеровского анемометра (ЛДА, DANTEC), собранного по дифференциальной схеме и представляющего собой систему с гетеродированием рассеянного вперед света. Излучение He–Ne лазера (мощность 10 мВт, длина волны 0.6328 мкм) расщеплялось на два одинаковых по

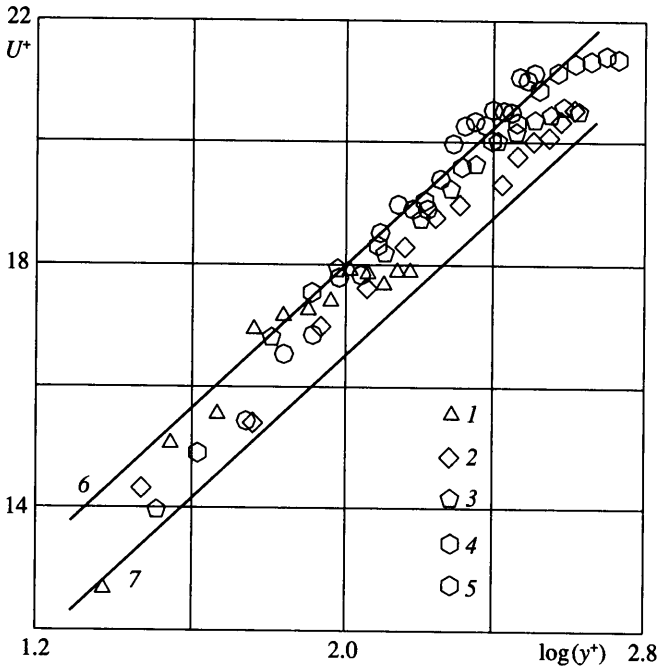
мощности пучка диаметром 1 мм. Оптическое смещение одного из пучков на 40 МГц относительно второго обеспечивало разрешение знаковой неопределенности результатов измерения скорости. Разнесенные на 60 мм параллельные пучки пересекались в задней фокальной плоскости 310-мм объектива, образуя в области пересечения измерительный объем $0.25 \times 0.25 \times 3.5$ мм, который определял локальность измерений скорости. При угле 11.42° между зондирующими пучками расстояние между интерференционными полосами 3.28 мкм, а масштабный коэффициент схемы 3.18 м/с/МГц. Рассеянный свет собирался объективом и направлялся в ФЭУ, выходной сигнал которого поступал на анализатор скорости потока FVA58N20, обеспечивающий статистический анализ доплеровского сигнала в диапазоне скоростей от -0.4 до 1.1 м/с, причем совокупная относительная ошибка измерений скорости не превышала 3%.

В экспериментах использовалась обычная водопроводная вода с достаточным количеством естественных рассеивающих центров. Для измерения профилей скорости излучающая и приемная части оптического тракта ЛДА помещались на столике, имеющем микрометрический ход 12 см по трем ортогональным координатам при разрешении 12 мкм. Измерения горизонтальной скорости u проводились вдоль вертикального направления y на участке от дна канала до границы воздух–вода. Измерения скорости воздуха проводились термоанемометром 90CN10/C10 (СТА Dantec), обеспечивающим калибровку и проведение измерений в автоматическом режиме. В экспериментах использовался клиновидный ленточный датчик 55R33, имеющий размеры чувствительного элемента 1×0.2 мм.

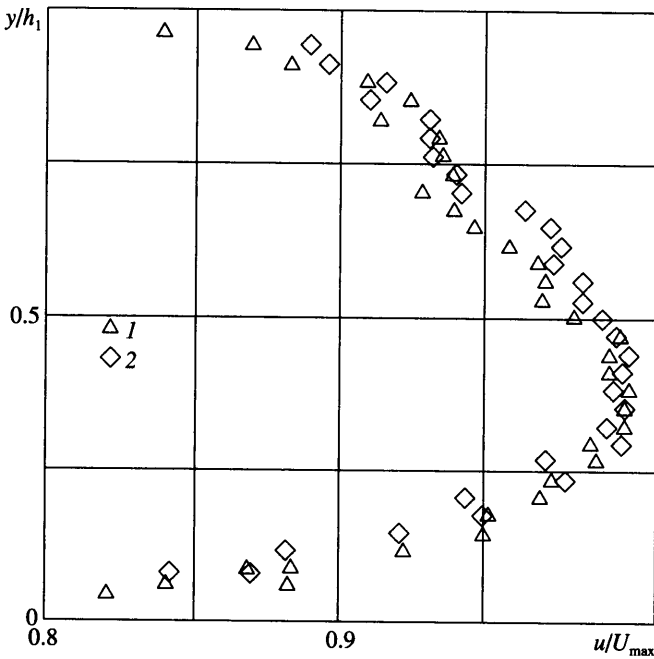
2. Результаты и обсуждение. С целью апробации точности измерительного комплекса проведены измерения профилей скорости однофазного воздушного (водяного) потока. Распределения средней горизонтальной компоненты скорости для пяти различных режимов течения представлены на фиг. 1. Числа Рейнольдса $R = 5535, 15862, 17786$ и 23670 отвечают симметричному потоку воздуха, а число $R = 7250$ – асимметричному потоку воды с нулевым касательным напряжением на свободной поверхности. Число R определялось по максимальной скорости, глубине и кинематической вязкости однофазного потока: $U_{\max} = 1.64, 4.70, 5.27$ и 7.01 м/с, $h = 54$ мм, $\nu_1 = 0.12$ см²/с для воздуха, и $U_{\max} = 1.64$ см/с, $h = 25$ мм, $\nu_2 = 0.01$ см²/с для воды соответственно. Вертикальная координата y и скорость u обезразмеривались следующим образом: $U^+ = u/u^*$, $y^+ = uy^*/\nu$, где $u^* = 0.477U_{\max}/\ln(0.06R_x)$ – динамическая скорость, $R_x = U_{\max}x/\nu$ – локальное число Рейнольдса для сечения $x = 140$ см. Из фиг. 1 следует, что результаты измерений подчиняются логарифмическому закону распределения скоростей. Прямые 6 и 7 определены по формуле $U^+ = 5.75 \log y^+ + B$ [14], где значения константы B равны 5 и 6.5. Имеет место неплохое соответствие между результатами измерений и универсальным законом распределения скоростей.

Распределения средней горизонтальной компоненты скорости воздуха для различных режимов течения для первоначально покоящегося слоя воды представлены на фиг. 2 и для движущегося слоя воды – на фиг. 3. Во всех случаях плоскость максимальной скорости воздуха смещена к границе раздела воздух–вода. Для нулевого расхода воды этот максимум определен при $y/h_1 \approx 0.39$, в случае проточного слоя воды $y/h_1 \approx 0.45$. Вплоть до скорости воздуха $U_{\max} \approx 4.6$ м/с волны на свободной поверхности воды не наблюдались. При $U_{\max} > 4.6$ м/с малые трехмерные волновые возмущения границы раздела имели длины порядка 1–2 см и амплитуды 0.1–0.2 мм. В диапазоне $U_{\max} = 6$ –8 м/с наблюдался переход первоначальной капиллярной ряби в двумерные волны, гребни которых располагались нормально направлению воздушного потока.

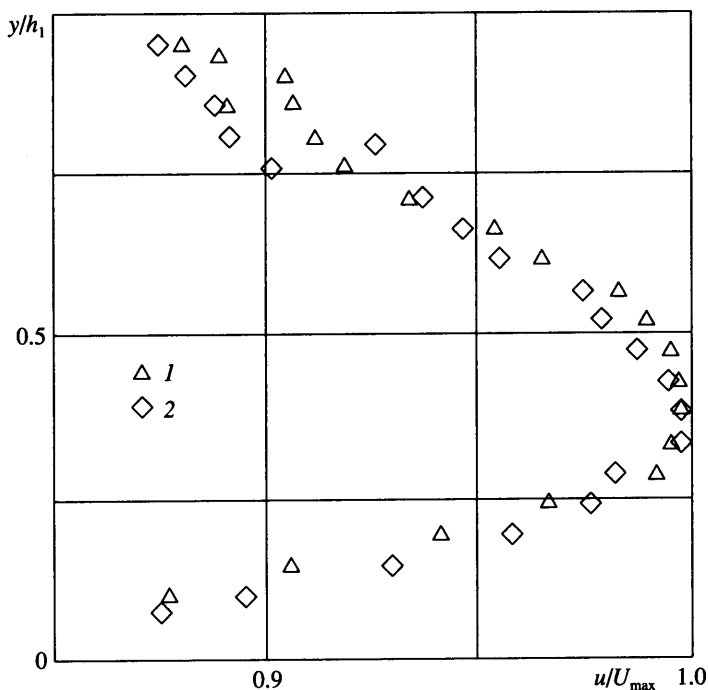
Под действием воздушного стационарного потока волны двигались вниз по потоку с возрастающей скоростью (0.3–0.4 м/с), их амплитуда и длина увеличивались с рас-



Фиг. 1. Вертикальное распределение скорости в случае однофазного потока: воздуха: 1 – $R = 5535$, 2 – 15862 , 3 – 17786 , 4 – 23670 ; вода: 5 – $R = 7250$; 6, 7 – логарифмический закон для $B = 5, 6.5$



Фиг. 2. Характерный профиль горизонтальной компоненты скорости воздуха в случае первоначально покоящейся воды. Координата y отсчитывается от невозмущенной границы раздела воздух-вода к верхней стенке канала, $h_1 = 34$ мм: 1 – $U_{max} = 7.22$, 2 – 7.96 м/с



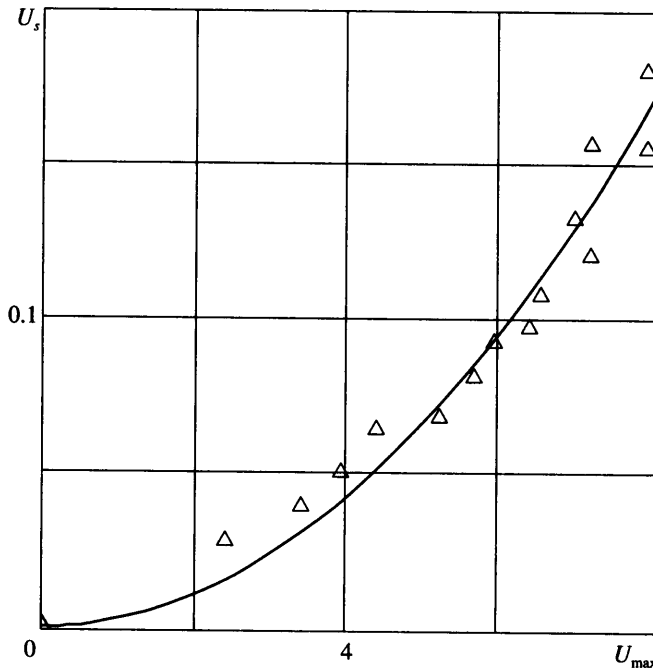
Фиг. 3. Характерный профиль горизонтальной скорости воздуха в случае движущегося слоя воды при $U_w = 0.083$ см/с, $h_1 = 34$ мм: 1 – $U_{\max} = 5.22$, 2 – 6.69 м/с

стоянием x . Для вертикальной плоскости $x = 140$ см характерные амплитуды и длины волн имели значения 0.5–1 мм и 2.5 см соответственно. В силу этих обстоятельств свободная поверхность воды не может полагаться гладкой, и касательные напряжения на ней должны превосходить соответствующие значения для гладкой верхней крышки канала.

Согласно [15], можно предположить несовпадение плоскости максимальной горизонтальной скорости воздушного потока с уровнем нулевых касательных напряжений. Это означает, что плоскость нулевых касательных напряжений в воздушной среде расположена ближе к гладкой поверхности – верхней крышке канала. Этот результат находится в соответствии с данными измерений [8], но расходится с формами профиля скорости воздуха, приведенными в [5, 16], из которых следует, что максимум скорости расположен выше середины воздушного пространства.

Воздушный поток оказывает существенное воздействие на слой воды. Поскольку подача воздуха в канал осуществлялась вентиляторной установкой на участке приблизительно постоянного сечения, вниз по потоку имелся ненулевой перепад давления. Соответствующий градиент давления увеличивался с ростом скорости воздуха и глубиной слоя воды. Для закрытого канала (первоначально покоящаяся вода) поток воздуха приводил к развитию дрейфового течения в приповерхностном слое воды, прилегающем к границе раздела, и возвратного течения вблизи дна канала. В случае проточного канала воздействие потока воздуха сказывалось в значительном искажении профиля горизонтальной компоненты скорости воды.

Зависимость поверхностной скорости воды U_s от максимальной скорости воздуха U_{\max} приведена на фиг. 4. Измерения проводились в диапазоне $U_{\max} = 3$ –8 м/с, обрушение



Фиг. 4. Зависимость поверхностной скорости U_s от максимальной скорости воздуха U_{\max} при $h_1 = 34$ мм, $h_2 = 20$ мм в случае первоначально покоящейся воды

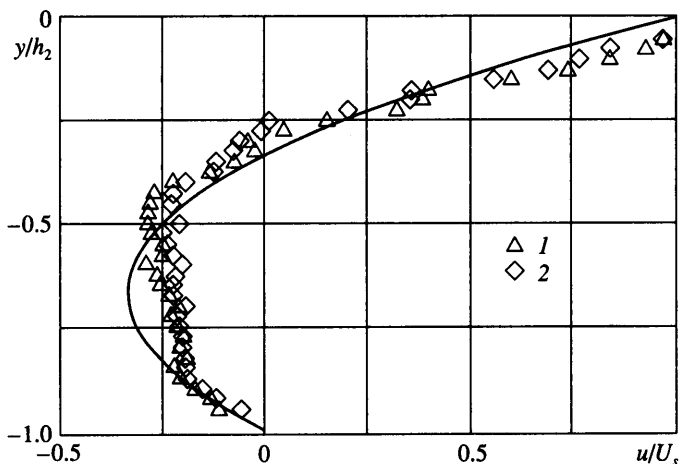
волн на границе раздела не наблюдалось. Поверхностная скорость оценивается диапазоном 0.02–0.18 м/с и описывается квадратичной зависимостью от скорости воздуха

$U_s = D U_{\max}^2$, где значение константы $D = 0.003$ с/м.

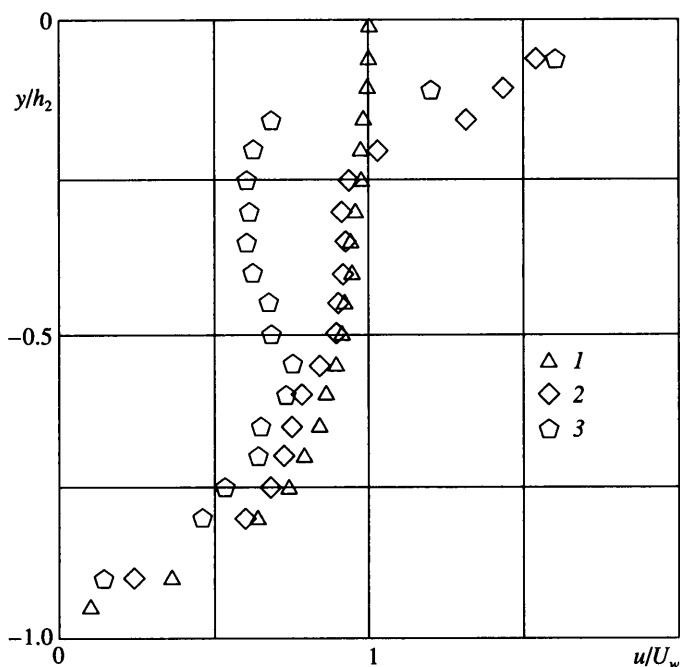
Разнонаправленное течение воды в настоящих экспериментах исследовано для широкого диапазона скорости воздушного потока $U_{\max} = 1-8$ м/с и двух глубин первоначально покоящегося слоя $h_2 = 12$ и 20 мм. При $U_{\max} < 3.5$ м/с основное течение воды полностью определялось направлением ветра, компенсационное течение практически не наблюдалось. При $U_{\max} > 3.5$ м/с мощное возвратное течение охватывало область порядка 70% толщины слоя воды, за исключением тонкого приповерхностного слоя. Характерные распределения средней горизонтальной скорости воды, обезразмеренные на поверхностную скорость U_s , приведены на фиг. 5. Отметим отсутствие резкого пика скорости вблизи дна, описанного в [11]. Кривая 3 на фиг. 5 соответствует параболическому распределению горизонтальной компоненты скорости ламинарного стационарного течения воды [17]

$$u/U_s = 1 + 4(y/h_2) + 3(y/h_2)^2 \quad (2.1)$$

Для однонаправленного воздушно-водяного потока распределения средней горизонтальной компоненты скорости воды даны на фиг. 6. Точки 1 отвечают скорости воды $U_w = 0.083$ м/с при нулевом расходе воздуха. Профиль скорости гладкий и полностью описывается моделью ламинарного течения в открытом канале. При скорости воздушного $U_{\max} = 4.64$ м/с вблизи свободной поверхности воды развивается струйно-подобное течение (точки 2). Поверхностная скорость $U_s \approx 1.5U_w$, индуцированное ветром течение охватывает область $-0.2 < y/h_2 < 0$. При скорости воздуха $U_{\max} = 5-8$ м/с поверхностная скорость возрастает, $U_s \approx 2U_w$, течение воды по всей толщине слоя



Фиг. 5. Распределение средней горизонтальной скорости индуцированного ветром течения при $h_2 = 20$ мм: 1 – $U_{\max} = 7.22$ м/с, $U_s = 12.1$ см/с; 2 – $U_{\max} = 7.96$ м/с, $U_s = 0.156$ см/с; 3 – расчет по (2.1)



Фиг. 6. Распределение средней горизонтальной скорости воды в однонаправленном воздушно-водяном потоке при $h_2 = 20$ мм, $U_w = 8.3$ см/с: 1 – $U_{\max} = 0$; 2 – 4.64; 3 – 6.72 м/с

происходит в направлении воздушного потока; при $y/h_2 \approx -0.25$ имеется различный локальный минимум скорости $u/U_w \approx 0.6$ и при $y/h_2 \approx -0.52$ локальный максимум $u/U_w \approx 0.75$ (точки 3). Указанные особенности распределения скорости являются общими для условий настоящего эксперимента $U_w = 0.08-0.22$ м/с и $h_2 = 12-20$ мм и требуют дальнейших исследований.

Заключение. Взаимодействие потоков воздуха и воды обуславливает смещение плоскости максимальной скорости воздуха к границе воздух–вода. Это обстоятельство следует учитывать при построении феноменологических моделей распределения касательных напряжений. Экспериментально обнаружено значительное искажение профиля скорости воды при однонаправленном воздушно-водяном течении.

Экспериментальная часть работы выполнена автором в лаборатории FUTURE Технологического университета KMUTT (Бангкок, Таиланд).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р.* Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
2. *Китайгородский С.А.* Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 284 с.
3. *Jeffreys H.* On the formation of water waves by wind // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1925. V. 107. № 742. P. 189–206; 1926. V. 110. № 754. P. 241–247.
4. *Капица П.Л.* К вопросу об образовании ветром морских волн. // Докл. АН СССР. 1949. Т. 64. № 4. С. 513–516.
5. *Ефимов В.В.* Динамика волновых процессов в пограничных слоях атмосферы и океана. Киев: Наук. думка, 1981. 255 с.
6. *Доброклонский С.В., Лесников Б.М.* Исследование приповерхностного слоя дрейфовых течений в лабораторных условиях // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1972. Т. 8. № 11. С. 1177–1187.
7. *Paras S.V., Karabelas A.J.* Measurements of local velocities inside thin liquid films in horizontal two-phase flow // Exp. Fluids. 1992. V. 13. № 2/3. P. 190–198.
8. *Paras S.V., Vlachos N.A., Karabelas A.J.* LDA measurements of local velocities inside the gas phase in horizontal stratified atomization two-phase flow // Int. J. Multiphase Flow. 1998. V. 24. № 4. P. 651–661.
9. *Lin J.T., Gad-el-Hak M.* Turbulent current measurements in a wind-wave tank // J. Geophys. Res. Ser. C. 1984. V. 89. № 1. P. 627–636.
10. *Wu J.* Wind-induced drift currents // J. Fluid. Mech. 1975. V. 68. Pt 1. P. 49–70.
11. *Baines W.D., Knapp D.J.* Wind driven water currents // J. Hydraul. Div. Proc. ASCE. 1965. V. 91. № 2. P. 205–221.
12. *Kranenburg C.* Mixed-layer deepening in lakes after wind setup // J. Hydraul. Eng. ASCE. 1985. V. 111. № 9. P. 1279–1297.
13. *Goossens L.H.J., van Papee H.J.A., Tessel P.J.* Vertical turbulent diffusion in air-driven water flows // J. Hydraul. Div. Proc. ASCE. 1982. V. 108. № 9. P. 995–1009.
14. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 528 с.
15. *Parthasarathy R.M., Muste M.* Velocity measurements in asymmetric turbulent channel flows // J. Hydr. Hydraul. Eng. ASCE. 1985. V. 120. № 9. P. 1000–1020.
16. *Dykhnо L.A., Williams L.R., Hanratty T.J.* Maps of mean gas velocity for stratified flows with and without atomization // Int. J. Multiphase Flow. 1994. V. 20. № 4. P. 691–702.
17. *Багров Н.А.* Развитие ветрового нагона в замкнутом море // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1946. Т. 10. № 6. С. 501–516.