

М. В. Никандров, Л. А. Славутский

Россия, 428015, г. Чебоксары, Московский пр., 15, ЧувГУ, e-mail: nixmak@mail.ru

Доплеровский ультразвуковой контроль неоднородного открытого потока жидкости

Получена 16.03.2005, опубликована 29.03.2005

Приводятся экспериментальные и теоретические результаты, полученные при комплексном (доплеровском и импульсном) ультразвуковом зондировании открытого потока жидкости. При учете неоднородности потока и изменения его глубины сделаны оценки точности доплеровских измерений. Показано, что в зависимости от концентрации фазовых включений в жидкости меняется амплитудная модуляция рассеянного сигнала и, соответственно, ширина доплеровского спектра. Цифровая спектральная обработка сигнала позволяет уменьшить статистическую погрешность измерения расхода жидкости. Анализ изменения ширины спектров позволяет оценить нижний порог чувствительности доплеровского расходомера и пределы применимости традиционных формул для расчета профиля потока жидкости.

ВВЕДЕНИЕ

В ультразвуковой расходомерии широко применяются как импульсные, так и доплеровские методы контроля скорости потока жидкости. Особую задачу представляет контроль открытого потока в частично заполненном трубопроводе или канале. В этом случае для точного определения расхода необходимо контролировать как профиль скорости потока, так и его глубину. Доплеровский контроль основывается на рассеянии ультразвуковых сигналов на фазовых включениях, концентрация и физические параметры которых значительно варьируются и сильно влияют на точность измерений. Связь между расходом и доплеровским сдвигом нелинейна вследствие изменения глубины и неоднородности потока. Ниже приводятся результаты комплексных (импульсных и доплеровских) измерений, которые позволяют оценить зависимость ультразвуковых сигналов от профиля скорости потока, его глубины и характеристик фазовых включений. Экспериментальные данные сопоставляются с результатами численного моделирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим открытый поток воды по лотку прямоугольного сечения. Такого рода задачи широко описаны в литературе [1]. Зная расход и вязкость воды, шероховатость и геометрические размеры лотка, теоретически можно определить все параметры потока.

Распределение скоростей по высоте $U(R)$ для живого сечения прямоугольной формы определяется формулой [1]

$$U(R) = \frac{\gamma}{2\eta} R(h - R) + \frac{U_{\max}}{h} R, \quad (1)$$

где i — пьезометрический уклон, γ — объемный вес, η — динамический коэффициент вязкости, U_{\max} находим из соотношения

$$U_{\max} = \frac{2Q - b \frac{\gamma}{2\eta} \int_0^h R(h - R) dR}{bh}, \quad (2)$$

где Q — расход, м³/с; b — ширина лотка, м; глубина потока h , м, определяется из формулы

$$h = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{iC^2b^2}}, \quad (3)$$

где C — коэффициент Шези, вычисляемый по формуле

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}, \quad (4)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения.

Коэффициенты, входящие в формулы (1–4), трудно определимы в реальных условиях и могут меняться со временем. Нами показана возможность контролировать глубину и скорость потока ультразвуковыми методами. Полученные экспериментальные данные сопоставлялись с расчетами по формулам (1–4).

Экспериментальные измерения и теоретическое моделирование проводились по схеме, показанной на рис. 1.

Рассеянный на фазовых включениях сигнал моделировался при помощи следующей формулы:

$$S(t) = \int_0^h A_{\text{ran}} \cos \left[f(R) \left(t - \frac{R}{\sin \alpha} + \frac{L_d}{\sin \alpha} \right) \right] dR. \quad (5)$$

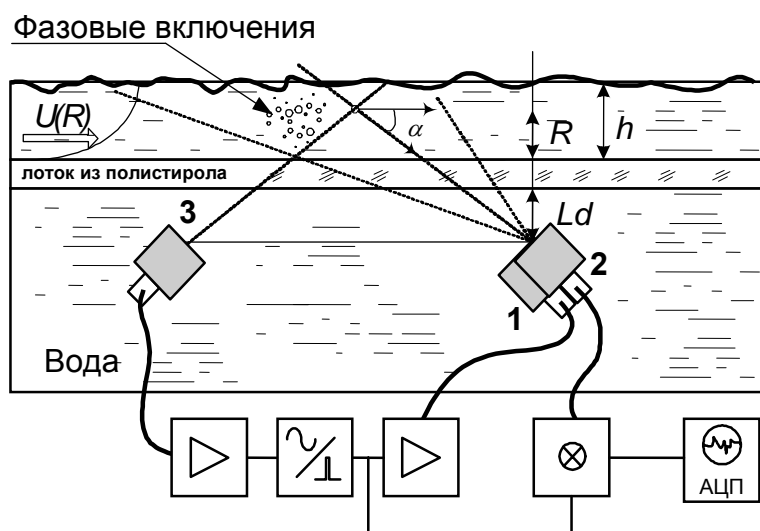


Рис. 1.
Схема эксперимента

Момент появления t рассеивающего элемента (фазовые включения) считался случайным, концентрация и, соответственно, расстояния между рассеивающими элементами — распределенными по закону Гаусса. Случайные координаты $R = R(t)$ фазовых включений по вертикальной оси считались равномерно распределенными по глубине потока. Размер фазовых включений (соответственно и амплитуда рассеянного сигнала $A_{ran} = A_{ran}(t)$) считались распределенными по закону Гаусса и не зависящими от R , c — скорость звука в жидкости, L_d — расстояние от пьезодатчика до лотка.

$$f(R) = f_0 \frac{\left(1 - \frac{U(R)}{c} \cos \alpha\right)}{\left(1 + \frac{U(R)}{c} \cos \alpha\right)}, \quad (6)$$

где $U(R)$ — значение скорости потока жидкости по координате R , $f(R)$ — доплеровская частота, α — угол доплеровского рассеяния, f_0 — несущая частота зондирования.

Таким образом, рассеянный сигнал имеет несущую переменную доплеровскую частоту f и амплитудную модуляцию $A_{ran}(t)$, которая определяется случайными импульсами с амплитудой, соответствующей размерам включений и длительностью, связанной с вертикальной координатой включения и временем его прохождения через облучаемую область, которое связано со скоростью потока.

При численном моделировании обнаружено, что соотношение между средневзвешенной частотой доплеровского сигнала и шириной спектра меняется в зависимости от параметров потока. При этом форма спектра определяется амплитудной и частотной модуляцией сигнала. В свою очередь амплитудная модуляция определяется, в основном, концентрацией включений, частотная — профилем потока.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 показана схема экспериментальных измерений. Использовался прямоугольный лоток из полистирола с толщиной стенки 0,7 мм. Размеры лотка 17×11×350 мм. Измерения проводились ближе к концу лотка, где движение воды можно считать установившимся.

Кроме излучающего ультразвукового преобразователя 1, использовались два приемных пьезодатчика 2 и 3 (резонансная частота всех преобразователей $\approx 1,4$ МГц).

Для контроля глубины потока использовалось импульсное зондирование, при этом регистрировалось распространение ультразвукового сигнала между симметричными преобразователями 1 и 3, на датчике 2 регистрировался непрерывный доплеровский сигнал.

Импульсные сигналы регистрировались цифровым осциллографом с частотой дискретизации 50 МГц. На рис. 2 показана форма импульсного сигнала и его спектр при различных значениях расхода и, соответственно, глубины потока воды. Как видно из рисунка, формы импульсных сигналов с увеличением глубины потока меняются в соответствии с интерференцией сигналов, отраженных от нижней поверхности лотка и верхней границы потока.

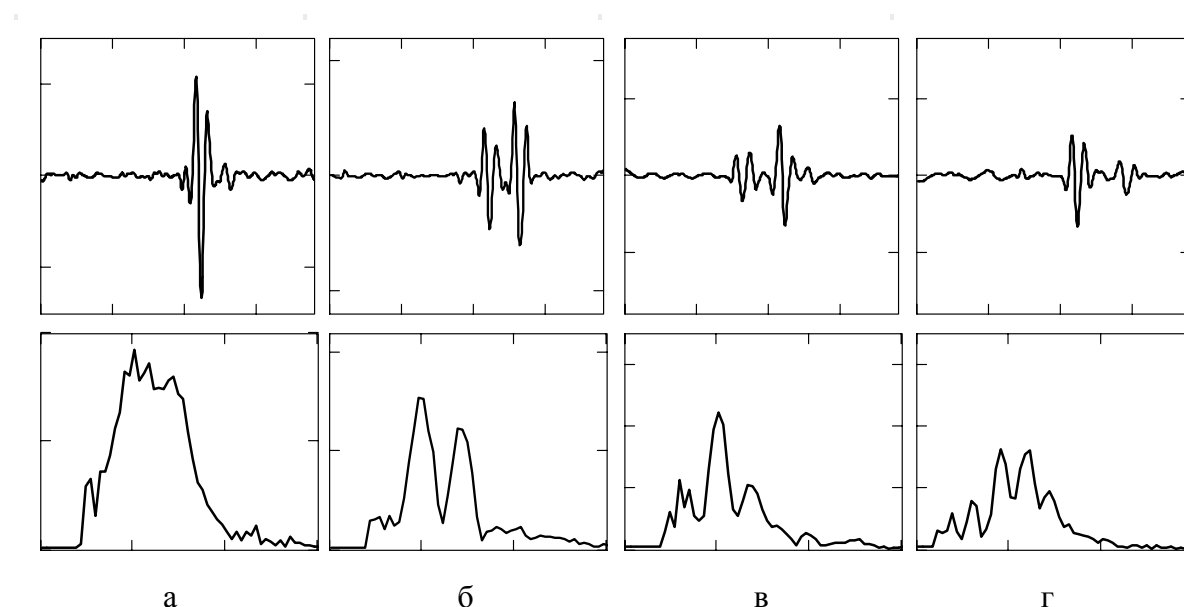


Рис. 2. Форма и спектр ультразвукового импульсного сигнала при расходах (мл/с):
а — без воды; б — 5,17; в — 53,7; г — 89,51

Мы определяли глубину потока по спектрам сигналов. В спектрах появляются резонансные пики, соответствующие частотам, когда по глубине потока укладывается целое число полуволен. В этом случае глубина потока определяется по формуле [2]:

$$h = \frac{\pi}{K_g} = \frac{c}{2(f_{n+1} - f_n) \sin \alpha}, \quad (7)$$

где K_g — вертикальная составляющая волнового числа, c — скорость звука в воде, м/с, α — угол скольжения импульсного сигнала, $n=1, 2, \dots$ — номер резонансного пика, f_n — частоты резонансных пиков.

На приемнике 2 регистрировался непрерывный доплеровский сигнал, рассеянный на фазовых включениях и на неровной поверхности потока жидкости. Скорость потока воды регулировалась насосом. Аналоговая обработка доплеровских сигналов, до оцифровки, проводилась по традиционной гетеродинной схеме с частотой гетеродина, соответствующей частоте зондирующего сигнала (1,4 МГц). Сигнал на выходе гетеродина (0 – 1 кГц) оцифровывался с частотой дискретизации 44 кГц при помощи АЦП звуковой карты компьютера. Это позволяет получить доплеровские спектры сигналов с точностью не ниже 1%.

Примеры доплеровских спектров, полученные в результате цифровой обработки сигналов (длительность записи ≈ 15 сек), при трех различных значениях расхода показаны на рис. 3. Как видно из рисунка, с увеличением расхода доплеровские спектры смещаются в высокочастотную область и существенно меняют форму. Изменения формы спектра зависят от профиля скорости потока жидкости.

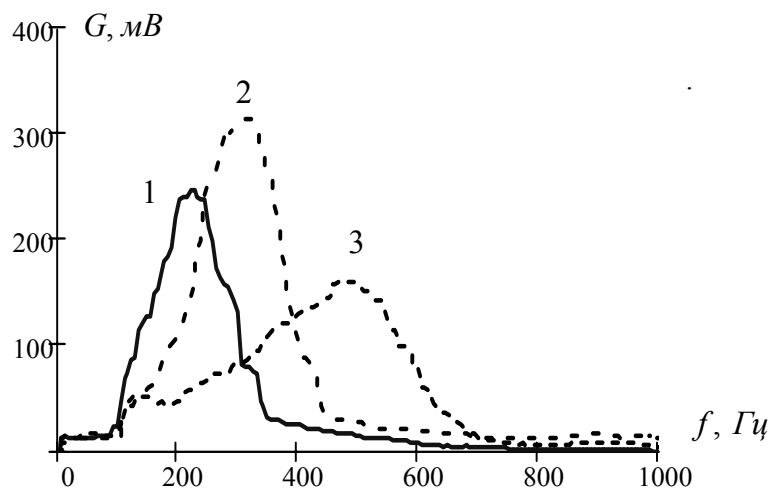


Рис. 3. Экспериментальные спектры доплеровских сигналов при различных значениях расхода: 1 — 6 мл/с, 2 — 15 мл/с, 3 — 53 мл/с

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для оценки факторов, влияющих на форму доплеровских спектров, проводилось численное моделирование рассеяния сигнала на фазовых включениях в жидкости с параметрами потока, полученными в ходе эксперимента.

При обработке экспериментальных данных регистрировалась средневзвешенная частота доплеровского спектра:

$$f_{cp} = \frac{\int_0^{\infty} G(f) f df}{\int_0^{\infty} G(f) df}, \quad (8)$$

где $G(f)$ — доплеровский спектр.

Затем, при обращении формулы (6), рассчитывалась эффективная скорость потока $U_{эф}(f_{cp})$ при разных значениях расхода. Соответствующая зависимость приведена на рис. 4, кривая 1.

Теоретически $U_{эф}$ рассчитывалась как средняя интегральная скорость потока

$$U_{эф} = \frac{\int_0^h U(R) dR}{h}, \quad \text{где } U(R) \text{ — результат моделирования по формуле (1).}$$

Соответствующая зависимость $U_{эф}$ от расхода Q приведена на рис. 4, кривая 2.

Если считать, что пики в доплеровских спектрах соответствует эффективной скорости, то экспериментальные данные позволяют построить зависимость эффективной скорости от расхода.

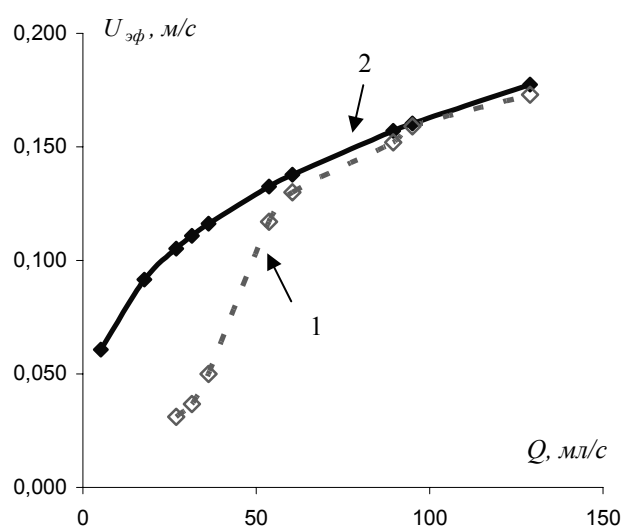


Рис. 4. Зависимость $U_{эф}(Q)$

пунктир — экспериментальная, сплошная — теоретическая

Как видно из рис. 4, экспериментальные и теоретические зависимости хорошо согласуются при большем расходе воды и значительно расходятся при малых скоростях потока.

По-видимому, расхождение полученных данных рис. 4 может быть связано с капиллярными эффектами и «прилипанием» воздушных пузырьков к стенкам лотка. Поскольку рассеяние на движущихся фазовых включениях дает основной вклад в доплеровский сигнал, их замедление, из-за взаимодействия со стенками лотка, может объяснить расхождение экспериментальных и теоретических данных.

На рис. 5 показаны расчетные зависимости средневзвешенной частоты f_{cp} (кривые 2, 4) и ширины спектра Δf (1, 3) от расхода при двух значениях концентрации включений. Как видно из рисунка, эти зависимости нелинейны. Доплеровский сдвиг и ширина доплеровского спектра меняются в зависимости от расхода непропорционально. По изменению отношения этих величин $K = \Delta f / f_{cp}$ в зависимости от расхода можно судить о соотношении между фазовой и амплитудной модуляцией сигнала. Соответствующие расчетные (5, 6) и экспериментальная (7) кривые показаны в правой части рисунка.

Концентрации включений для кривых 1, 2, 5 и 3, 4, 6 различаются в три раза. Зависимости 3, 4, 6 соответствуют низкой концентрации.

Как видно из рисунка, форма экспериментальной и расчетных зависимостей K от расхода согласуются. Зависимости для величины K имеют характерный максимум, который смещается в область высоких расходов с уменьшением концентрации включений.

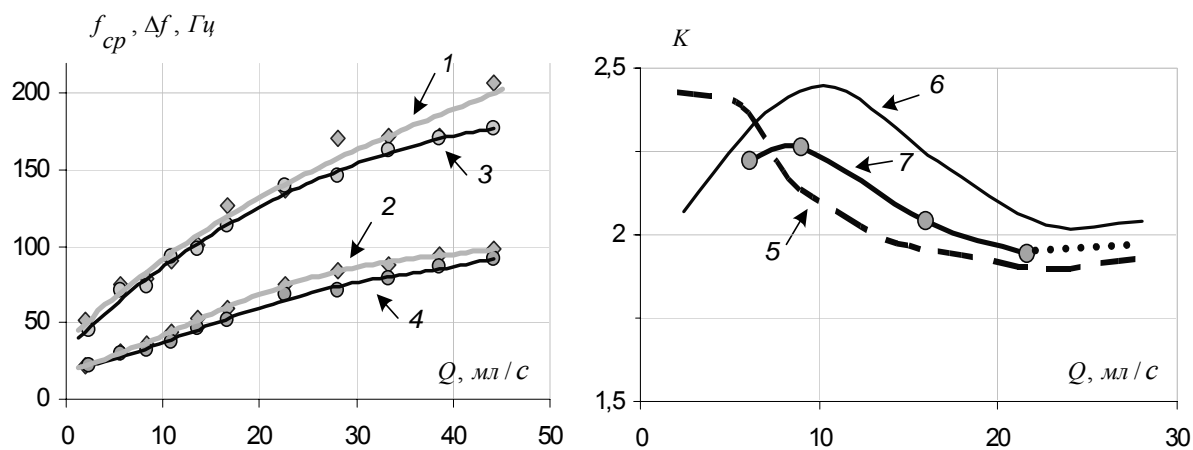


Рис. 5. Характеристики доплеровских спектров (1 – 4) и отношение ширины спектра к средневзвешенной частоте от расхода (5, 6); 7 — экспериментальная зависимость отношения ширины спектра к средневзвешенной частоте

При большой скорости потока, зависимости для K насыщаются, т. е. отношение ширины Δf к среднему доплеровскому сдвигу f_{cp} не меняется. Это может иметь следующее объяснение. При прохождении отдельных включений через ультразвуковое поле возникает рассеянный сигнал в форме радиоимпульса, частота заполнения

которого определяется скоростью движения пузырька, амплитуда — его размерами, а длительность огибающей — временем прохождения сквозь ограниченную область, облучаемую ультразвуком. При большой скорости потока увеличение частоты заполнения оказывается пропорциональным уменьшению длительности соответствующего импульса огибающей. В результате расширение спектра за счет уменьшения длительности огибающей соответствует смещению спектра в высокочастотную область за счет увеличения доплеровского сдвига. Вследствие этого величина K не меняется с увеличением расхода.

Таким образом, для повышения точности определения расхода необходимо учитывать амплитудную модуляцию сигналов, связанную с концентрацией включений и временем их прохождения в ультразвуковом поле. Определение отношения K позволяет, таким образом, оценить нижний порог измерения расхода жидкости, при котором концентрация фазовых включений имеет принципиальное значение.

Традиционно в доплеровских ультразвуковых расходомерах частотный сдвиг оценивается по числу перехода сигнала через ноль за время измерения. При этом амплитудная модуляция сигнала и соответственно форма доплеровского спектра не учитывается. Это приводит к систематическим ошибкам, поскольку профиль потока и концентрация включений в практических задачах могут оказывать существенное влияние на результат измерений. Оценка доплеровского сдвига по средневзвешенной частоте спектра позволяет учесть амплитудную модуляцию и повысить точность измерений.

На рис. 6 даны результаты цифровой обработки сигналов двумя методами: по числу переходов сигналов через ноль (1, 2) и по средневзвешенной частоте спектра (3, 4). Показаны относительные погрешности измерений по результатам статистической обработки при разных значениях расхода по 20 записям длительностью 160 мс (1, 3) и 320 мс (2, 4).

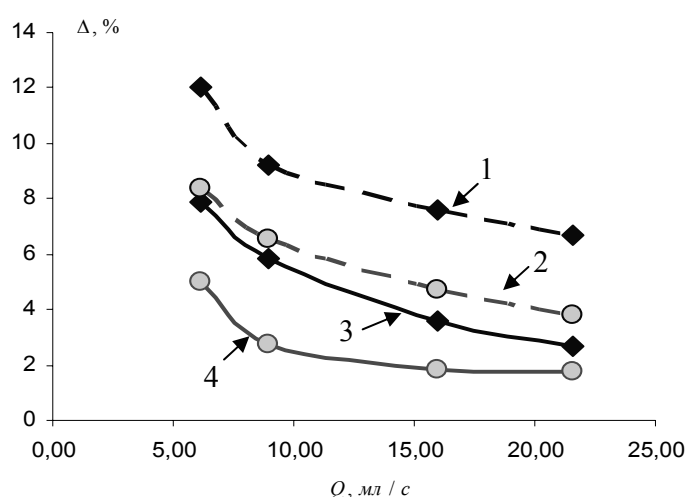


Рис. 6. Зависимость относительной погрешности при определении доплеровского сдвига при регистрации числа переходов сигнала через ноль (1, 2) и по средневзвешенной частоте спектра (3, 4)

Относительная статистическая погрешность измерения средневзвешенной частоты спектра оказывается значительно ниже погрешности, полученной традиционным методом, и на рабочих режимах не превышает 2% при длине записи 320 мс.

Таким образом, цифровая обработка доплеровских сигналов с учетом формы спектров позволяет оценить влияние профиля потока и амплитудной модуляции сигналов, зависящей от параметров фазовых включений, повысить точность измерений в задачах в ультразвуковой расходомерии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексные импульсные и доплеровские измерения позволяют одновременно определить глубину и скорость открытого потока жидкости. Поскольку эти параметры связаны между собой, полученные данные могут использоваться как для задач расходомерии, так и для определения вязких свойств жидкости [3]. Кроме того, профиль потока существенно зависит от коэффициента шероховатости стенок лотка, поэтому он может быть определен через ультразвуковые измерения параметров потока, в тех случаях, когда контактные методы [4] неприемлемы. Спектральный анализ доплеровских сигналов позволяет учесть влияние профиля потока жидкости и амплитудной модуляции сигналов, увеличить точность измерений.

Связь между расходом и доплеровским сдвигом нелинейна вследствие изменения глубины и неоднородности потока. Для оценки нижнего порога измерений скорости потока, выше которого можно использовать традиционную формулу для профиля потока (1), необходимо учитывать концентрацию включений (амплитудную модуляцию сигнала и, соответственно, расширение доплеровского спектра), а так же гидрофизические эффекты, приводящие к излому экспериментальной зависимости (рис. 4) при малых расходах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чугаев Р. Р. Гидравлика. Л.: Энергия, 1970 г.
2. Ультразвук. Малая энциклопедия. Глав. ред. Голямина И. П. М.: «Советская энциклопедия», 1979 г.
3. Славутский Л. А., Никандров М. В., Туханов Д. Б. Контроль профиля потока жидкости по модовой структуре ультразвукового сигнала. Электронный журнал «Техническая акустика» <<http://webcenter.ru/~eeaa/ejta>> 2003, 17.
4. Мاستик А. А. Исследования сопротивления движению воды в открытых призматических руслах. Тарту, Изд. ЭСХА, 1959 г.