АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1998, том 44, № 6, с. 829–836

УДК 534.8:534.6.08:532.57

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ В МНОГОПЛОСКОСТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЯХ

© 1998 г. М. Н. Рычагов

Московский институт электронной техники (МИЭТ)
Факультет электронных и компьютерных технологий
Кафедра теоретической и экспериментальной физики
103498 Зеленоград
E-mail: mr@org833.zgrad.ru

Поступила в редакцию 03.02.98 г.

В статье рассматриваются вопросы оптимизации и повышения информативности многоплоскостных ультразвуковых расходомерных измерений потоков в промышленных системах транспортировки жидкости и газа. Анализируется методика измерений, основанная на использовании специальных мультисенсорных измерительных модулей, конструкция и оснащение которых ориентированы на высокоточное измерение разностей времен пролета акустических сигналов, регистрируемых в нескольких параллельных измерительных плоскостях. Положение измерительных плоскостей относительно оси канала транспортировки определяется выбором процедур численного интегрирования профиля аксиальной скорости потока, при которых интегральные соотношения заменяются соответствующими квадратурными формулами. В данной работе методика многоплоскостного оценивания поперечного профиля аксиальной скорости потока и формирование расходомерных оценок в цилиндрических каналах транспортировки жидкости или газа демонстрируется и анализируется на примере так называемой схемы измерений Гаусса–Чебышева (ГЧ – измерительный модуль).

1. ВВЕДЕНИЕ

Техника ультразвуковых времяпролетных измерений, оптимизация и повышение информативности которой является целью настоящей работы, заключается в регистрации разницы времен распространения ультразвуковых сигналов, генерируемых парой излучателей, закрепленных на некотором расстоянии друг от друга на стенках измерительного канала. В присутствии потока, время регистрации ультразвукового сигнала, распространяющегося в направлении потока, сокращается по сравнению с аналогичной величиной для импульса, генерируемого в противоположном направлении; фиксируемая таким образом разница во временах пролета Δt пропорциональна среднему значению вектора скорости потока вдоль траектории распространения сигналов.

Достигнутая к настоящему времени точность определения скорости в практических (некалибрационных) условиях эксплуатации составляет $\pm(1–2)\%$ при скоростях потока >0.3 м/с и ±0.01 м/с при скоростях ≤0.3 м/с [1–3]. Следует учитывать, что достижение столь высокой точности измерений стало результатом разработки высокоточных схем регистрации разности времен пролета акустических сигналов. Так, например, достижение указанной выше точности при измерениях потоков в трубопроводах диаметром 5–25 см требует точности определения Δt ~ нескольких единиц и даже долей наносекунд. Достижение же более прецизионной точности будет фактически соответствовать пределу метрологических возможностей метода в условиях реальных промышленных измерений. Тем не менее, актуальность повышения точности измерений потоков не уменьшается: стоимость затрат потребителей по услугам, измеряемым потокомерами, исчисляется в мире огромной суммой – многими десятками миллиардов долларов (данные ДФГ, Германия, 1995 г.).

Как было отмечено выше, непосредственное использование двухдатчиковой схемы ультразвуковых времяпролетных измерений позволяет получить лишь усредненную вдоль траектории сигнала оценку значения вектора скорости без учета реальной формы профиля скорости потока в поперечном сечении канала и без учета возможных вихревых движений, существенно изменяющих картину распределения поля скоростей в исследуемом объеме.

В большинстве случаев указанные проблемы решаются проектированием специальных мультисенсорных измерительных модулей, конструкция и оснащение которых ориентированы на решение конкретной измерительной задачи. Сконструированные таким образом модули встраиваются впоследствии в измерительный канал. Анализ факторов, оказывающих влияние на точность измерений в ультразвуковых многодатчиковых расходомерах, а также их всесторонняя

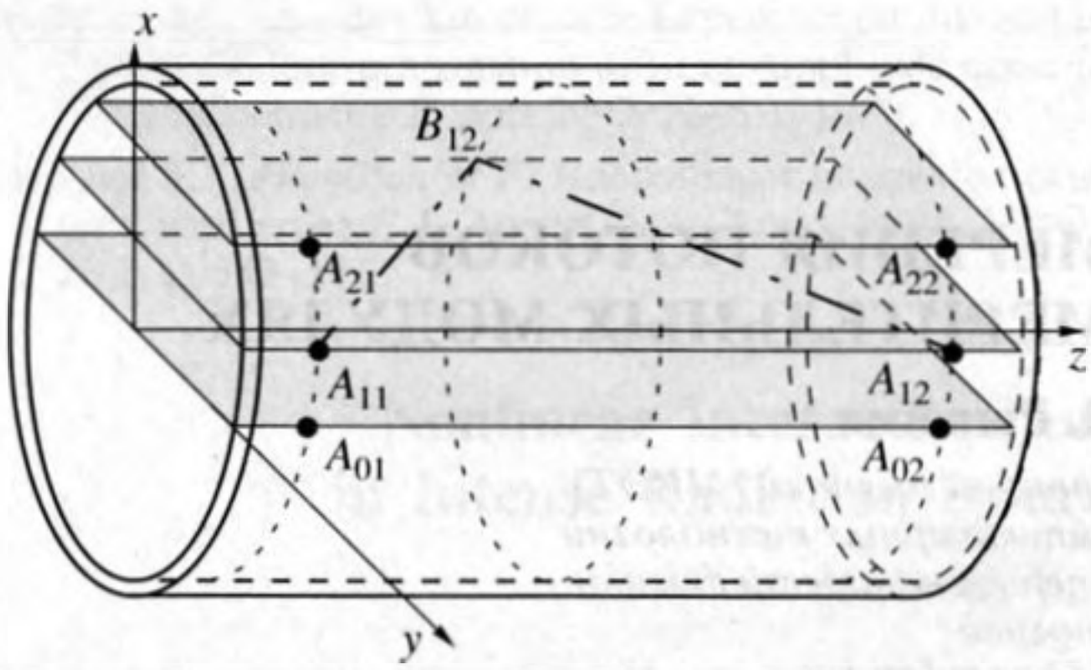

Рис. 1. Схема многоплоскостных ультразвуковых расходомерных измерений. С целью упрощения на рисунке представлены лишь три измерительных плоскости: две плоскости, соответствующие положительным хордовым значениям x, а также диаметральная измерительная плоскость.

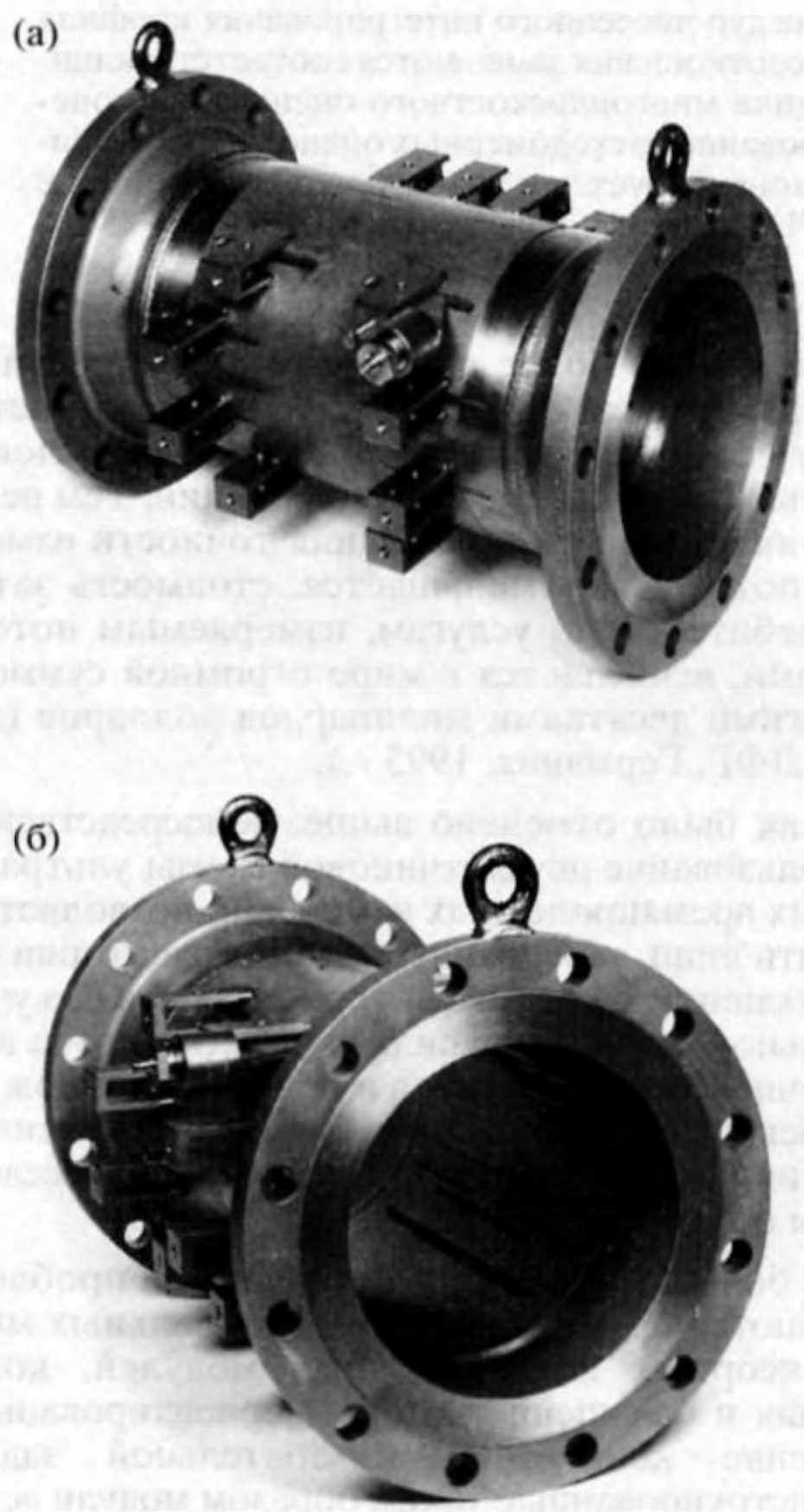

Рис. 2. Вариант конструктивного исполнения промышленного ГЧ измерительного модуля. © 1997 Panametrics, воспроизводится с разрешения.

конструктивная модернизация, оформившиеся в самостоятельное направление в начале восьмидесятых годов (см., например, [4]), являются в настоящее время важной проблемой мониторинга систем транспортировки жидких или газообразных сред и промышленных технологических установок [5–6].

В данной работе анализируется методика оценивания поперечного профиля аксиальной скорости потока в цилиндрических каналах транспортировки жидкости или газа с использованием так называемой схемы измерений Гаусса–Чебышева (ГЧ-измерительный модуль) [7].

2. КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Конструкция модуля, схематически изображенная на рис. 1, представляет собой 5–7 пар излучателей, вмонтированных в стенки модуля и образующих соответствующее количество измерительных плоскостей, параллельных оси канала и отстоящих от нее на расчетных расстояниях. Здесь и далее рассматривается измерительный модуль, в котором реализуется отражательная схема регистрации измерительных сигналов (см. рис. 1, 2). При этом регистрируемыми в измерительном процессе величинами являются разности времен пролета ультразвуковых импульсов, генерируемых в противоположных направлениях датчиками A_{n1} и A_{n2} и однократно отраженных на противоположной стенке модуля в точках B_{n1}, где n – номер измерительной плоскости. Модификация данной схемы в рамках плоско-параллельных измерений возможна по двум направлениям: использование трансмиссионного режима (рис. 3а) и увеличение кратности отражений (рис. 3б). В обоих случаях геометрическая конфигурация измерительного блока должна обеспечивать максимальное отношение сигнал–шум в рамках выбранной схемы измерений. С этой целью каждый трансейвер должен быть ориентирован таким образом, чтобы максимум его диаграммы направленности совпадал с расчетным направлением распространения сигнала. Во-вторых, с целью исключения влияния кривизны стенок измерительного модуля в предполагаемых местах отражения сигнала B_{nm} должны быть подготовлены отражательные площадки, ориентированные в плоскости измерений. Индекс m характеризует предполагаемую кратность отражений сигнала. Как будет показано ниже, конструкция модуля позволяет оценить распределение модуля вектора скорости вдоль центральной хорды канала, перпендикулярной плоскостям измерений.

3. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ

3.1. Аппроксимация профиля скорости

Пусть ξ_n – расстояние до n-й измерительной плоскости от начала системы координат; D – внутренний диаметр канала и L – расстояние между измерительными датчиками. Будем рассматривать безвихревое движение жидкости в канале в направлении оси z, т.е., $\mathbf{v} = (0, 0, v_z(x, y))$. Предположим также, что распределение вектора скорости v_z в поперечном сечении канала обладает осевой симметрией, и, следовательно, $v_z = v_z(\xi)$.

Тогда, как следует из геометрии задачи, время распространения акустического импульса, генерируемого датчиком A_{n1} и регистрируемого датчиком A_{n2}: т.е. в направлении потока, равняется:

$$t_{A_{n1}\to A_{n2}} = \frac{2|A_{n1}B_{n1}|}{c_0 + \dfrac{L}{2|A_{n1}B_{n1}|}\overline{v}_z(\xi_n)}, \qquad (1)$$

где c_0 – скорость звука в однородной неподвижной среде

$$\overline{v}_z(\xi_n) = \frac{1}{|A_{n1}B_{n1}|}\int\limits_0^{|A_{n1}B_{n1}|} v_z(l)dl \qquad (2)$$

– средняя скорость потока в n-м сечении канала, а интегрирование производится вдоль направления распространения сигнала.

Заметим, что $\overline{v}_z(\xi_n)$ по существу является преобразованием Абеля от радиально-симметричного распределения профиля скорости, что позволяет, в принципе, осуществить точное восстановление $\overline{v}_z$ при достаточном количестве измерительных плоскостей.

Аналогично, время распространения акустического импульса, генерируемого датчиком A_{n2} и регистрируемого датчиком A_{n1}, т.е. в противоположном потоку направлении, равняется:

$$t_{A_{n2}\to A_{n1}} = \frac{2|A_{n1}B_{n1}|}{c_0 - \dfrac{L}{2|A_{n1}B_{n1}|}\overline{v}_z(\xi_n)}. \qquad (3)$$

Очевидно, что если $v_z(\xi_n) \neq 0$, то $t_{A_{n2}\to A_{n1}} > t_{A_{n1}\to A_{n2}}$. Соответствующая разница во временах пролета, обусловленная наличием движения среды в измерительном канале, $\Delta t(\xi_n) = t_{A_{n2}\to A_{n1}} - t_{A_{n1}\to A_{n2}}$, может быть вычислена по формуле:

$$\Delta t(\xi_n) = \frac{2L}{c_0^2\left\{1 - \left[\dfrac{L}{2c_0|A_{n1}B_{n1}|}\overline{v}_z(\xi_n)\right]^2\right\}}\overline{v}_z(\xi_n). \qquad (4)$$

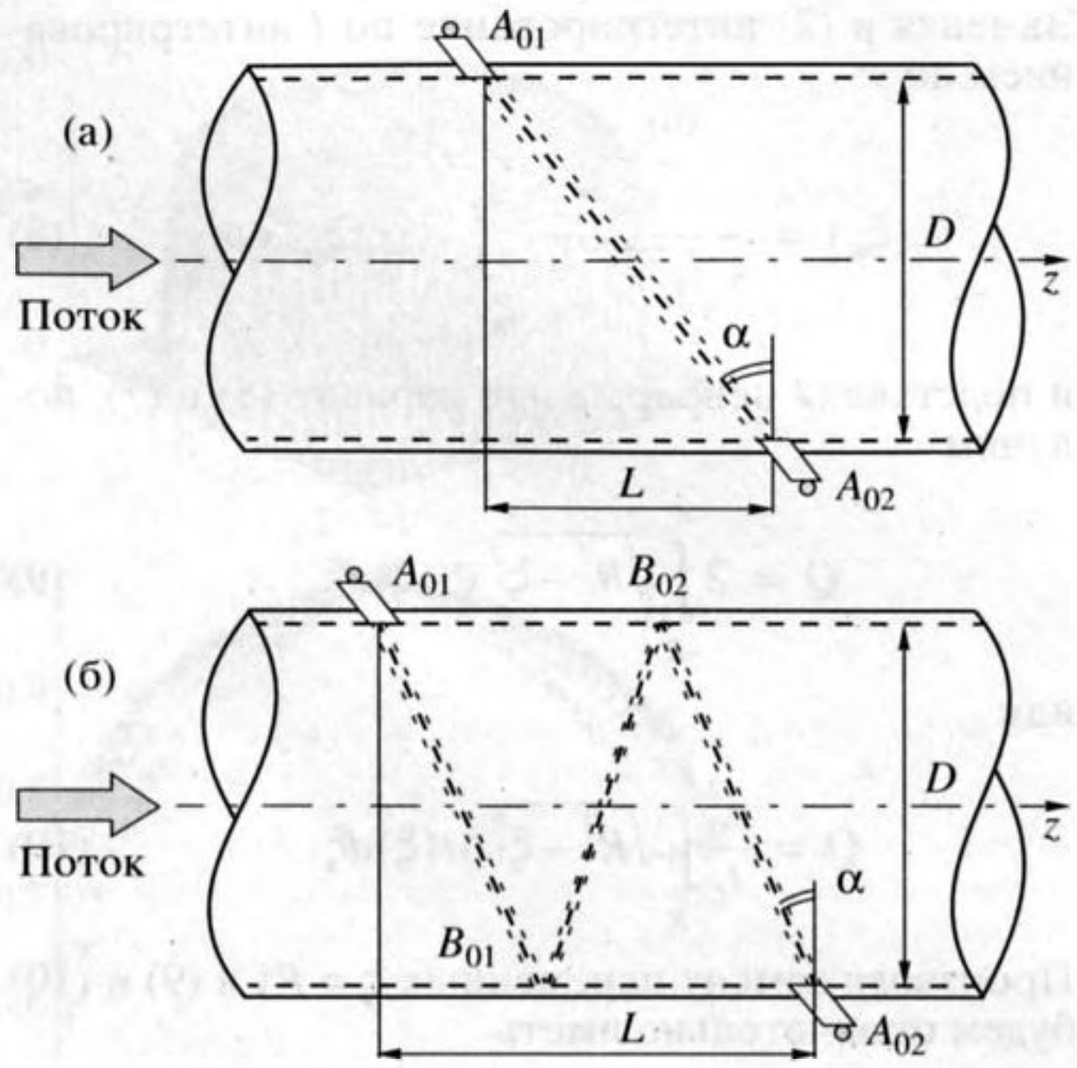

Рис. 3. Варианты конструктивных реализаций многоплоскостного измерительного ГЧ-модуля, реализующие регистрацию просветного (а) и двукратно отраженного (б) сигналов. На рисунке изображена лишь диаметральная измерительная плоскость.

Таким образом, как следует из (4), среднее значение скорости потока $\overline{v}_z(\xi_n)$ в n-м измерительном сечении может быть вычислено на основании измерения $\Delta t(\xi_n)$ по формуле:

$$\overline{v}_z(\xi_n) \approx \frac{c_0^2}{2L}\Delta t(\xi_n). \qquad (5)$$

3.2. Оценка величины расхода

Расход жидкости или газа Q, транспортируемого по трубопроводу, определяется количеством жидкости или газа, протекающим через поперечное сечение S канала транспортировки. Для установившегося потока расход определяется выражением:

$$Q = \iint\limits_S v_z(x, y)dxdy. \qquad (6)$$

Формула (6) может быть переписана в виде:

$$Q = \int\limits_{-R}^{R}\int\limits_{-\sqrt{R^2-\xi^2}}^{\sqrt{R^2-\xi^2}} v_z(\xi, y)dyd\xi. \qquad (7)$$

Заменяя в (2) интегрирование по l интегрированием по y:

$$\overline{v}_z(\xi_n) = \frac{1}{2\sqrt{R^2-\xi_n^2}}\int\limits_{-\sqrt{R^2-\xi_n^2}}^{\sqrt{R^2-\xi_n^2}} v_z(\xi_n, y)dy \qquad (8)$$

и подставляя непрерывный вариант (8) в (7), получим

$$Q = 2\int\limits_{-R}^{R}\sqrt{R^2-\xi^2}\,\overline{v}_z(\xi)d\xi, \qquad (9)$$

или

$$Q = \frac{c_0^2}{L}\int\limits_{-R}^{R}\sqrt{R^2-\xi^2}\,\Delta t(\xi)d\xi. \qquad (10)$$

Производя замену переменных $\xi = R\tau$ в (9) и (10) будем окончательно иметь

$$Q = 2R^2\int\limits_{-1}^{+1}\sqrt{1-\tau^2}\,\overline{v}_z(R\tau)d\tau, \qquad (11)$$

или

$$Q = \frac{R^2c_0^2}{L}\int\limits_{-1}^{+1}\sqrt{1-\tau^2}\,\Delta t(R\tau)d\tau. \qquad (12)$$

Поскольку измерительные данные $\Delta t(\xi) = \Delta t(R\tau)$, а значит и величины средних значений скорости $\overline{v}_z(\xi) = \overline{v}_z(R\tau)$, доступны в реальных условиях лишь в ограниченном наборе измерительных плоскостей, при вычислении Q с помощью (11), (12) приходится прибегать к численному интегрированию, при котором указанные интегралы заменяются соответствующими квадратурными формулами. В приложении A приведены основные формулы для приближенного вычисления указанных интегралов, которые получаются при использовании интерполирования подынтегральной функции алгебраическими многочленами [8].

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Современные методы вычислительной динамики жидкости дают возможность производить компьютерное моделирование широкого спектра жидких потоков в различного рода каналах с произвольными изменениями конфигурации (сужение и расширение канала, 90°-изгиб, пространственный двойной изгиб, T – сопряженное ответвление, T – сопряженное включение и т.д.) для различных значений скоростей потоков и чисел Рейнольдса. Применение этих методов позволит, по нашему мнению, улучшить как собственно процесс проектирования измерительных модулей, так и стать дополнительным средством косвенной калибровки и оптимизации ультразвуковых потокомеров.

Целью настоящего численного моделирования является вычислительная демонстрация процедур обработки данных, изложенная в пп. 3.1 и 3.2.

Осесимметричное распределение вектора аксиальной скорости потока в произвольном канале кругового сечения будем описывать известным аналитическим выражением [9]:

$$v_z(\rho) = a(1-\rho)^{1/b}, \qquad (13)$$

где a – размерный коэффициент, ρ – расстояние от точки наблюдения до оси канала,

$$b = \frac{1}{0.266 - 0.027\log_{10}(Re)} \text{ или } b = 1.66\log_{10}(Re). \qquad (14)$$

Ограничиваясь числами Рейнольдса $4000 \le Re \le 3.24\times10^6$, будем использовать значения b в (13) в интервале $b = 6$–11 (рис. 4) [10].

Произведем дискретизацию поперечного сечения канала, разбивая каждую из осей координатной системы Oxy на $2N_\delta + 1$ эквидистантных узлов в интервале $[-R, R]$ с шагом дискретизации $\delta = \dfrac{R}{N_\delta}$.

Тогда для каждого n-го сечения (для каждой n-й плоскости измерений) число ячеек дискретизации N_t, в которых рассчитываются (моделируются) значения вектора скорости $v_z(\rho)$, может быть рассчитано по формуле:

$$N_t = 2N' + 1 = \left[\frac{\sqrt{R^2-\xi_n^2}}{\delta}\right], \qquad (15)$$

где $[\circ]$ – целая часть числа. Учитывая, что $\rho_{n,n'} = \sqrt{\xi_n^2 + (n'\delta)^2}$, где ξ_n – n-й отсчет в квадратурной формуле численного интегрирования, дискретные значения профиля скорости в сечении канала вычисляются в виде:

$$v_z(\rho_{n,n'}) = a\left(1-\sqrt{\xi_n^2+(n'\delta)^2}\right)^{1.66\log_{10}(Re)}, \qquad (16)$$

а среднее значение аксиальной скорости в n-й плоскости измерений будет равняться:

$$\bar{v}_z(\xi_n) = \frac{1}{N_t}\sum_{n'=-N'}^{N'} v_z(\rho_{n,n'}). \qquad (17)$$

Будем предполагать, что измерения производятся в N плоскостях, отстоящих от оси канала на расстояниях

$$\xi_n = R\cos\frac{2n-1}{2N}\pi.$$

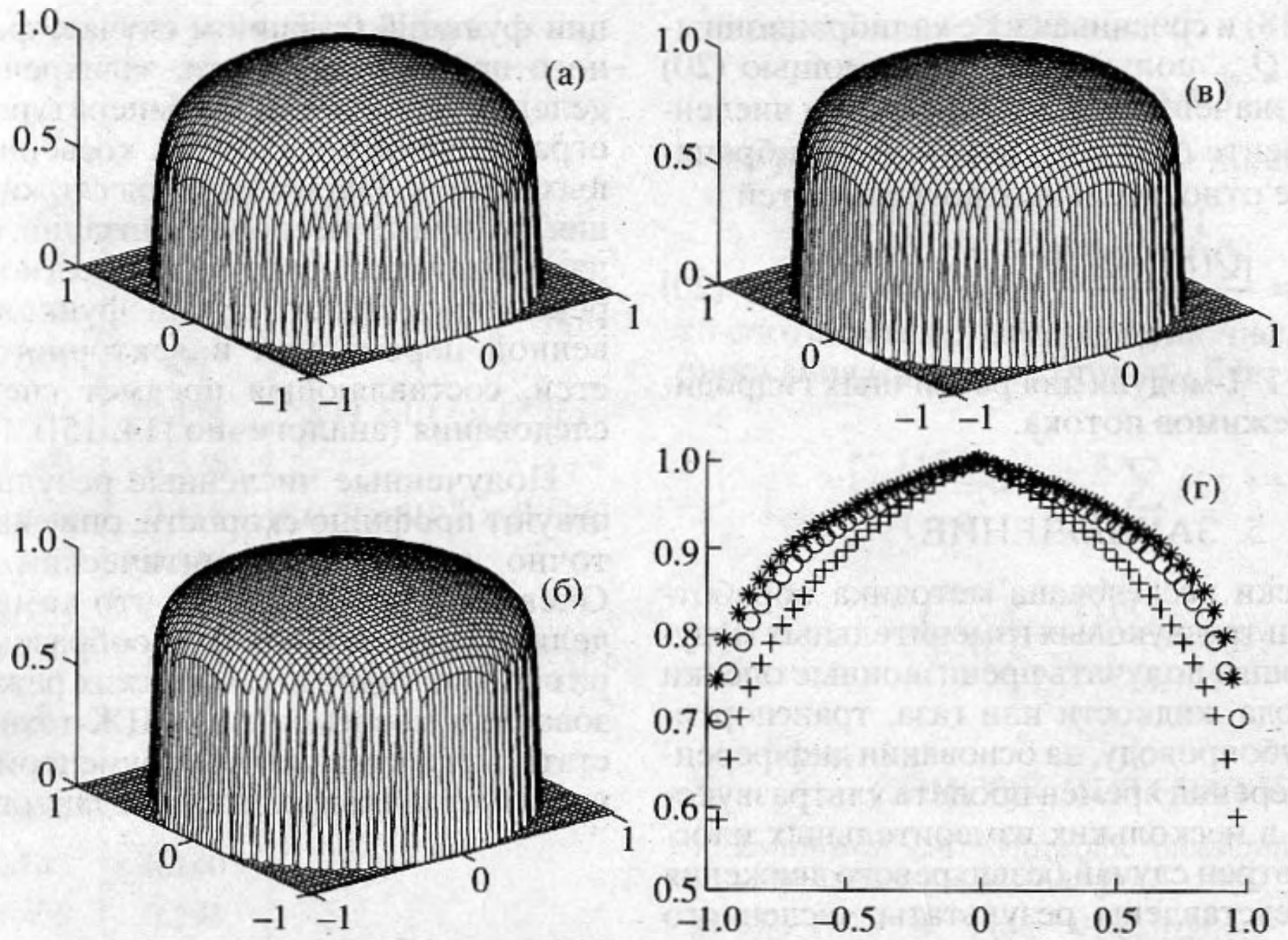

Рис. 4. Профиль вектора скорости в поперечном сечении канала для различных значений параметра b в (14): $b = 6$ (а), $b = 8$ (б), $b = 11$ (в); г – центральные сечения каждого из профилей: + – $b = 6$; ○ – $b = 8$, * – $b = 11$.

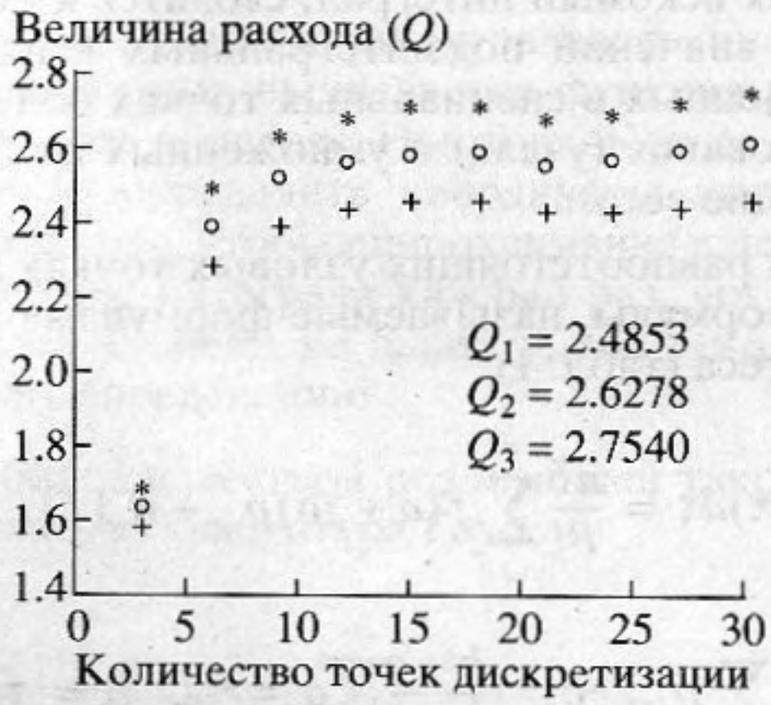

Рис. 5. Оценки величины расхода при различных размерностях дискретизации поперечного сечения канала: + – $b = 6$; ○ – $b = 8$, * – $b = 11$. Цифровые данные соответствуют калибрационным оценкам.

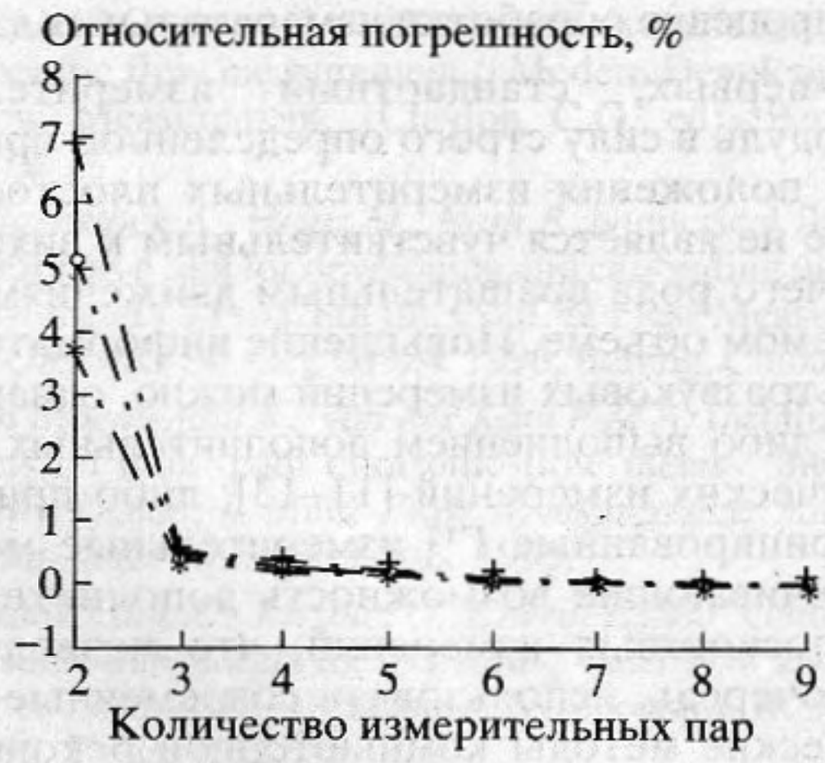

Рис. 6. Относительная погрешность расходомерных ГЧ-измерений в зависимости от количества пар измерительных датчиков: + – $b = 6$; ○ – $b = 8$, * – $b = 11$.

Тогда, применяя квадратурную формулу Эрмита (П.4), оценка величины расхода, формируемая в процессе измерений с помощью ГЧ-модуля, может быть аппроксимирована в виде:

$$Q = \frac{2R^2\pi a}{NN'}\sum_{n=1}^{N}\sum_{n'=-N'}^{N'}\left(1-\left(R\cos\frac{2n-1}{2N}\pi\right)^2\right)\times \tag{18}$$
$$\times\left(1-\sqrt{\xi_n^2+(n'\delta)^2}\right)^{1.66\log_{10}(Re)}.$$

С другой стороны, учитывая то обстоятельство, что профиль скорости известен в численном эксперименте в произвольной точке канала, увеличивая размерность дискретизации N_δ можно получить следующую калибрационную оценку Q:

$$Q_{\text{cal}} = \delta^2\sum_{n'=-N_\delta}^{N_\delta}\sum_{n''=-N'}^{N'} v_z(n'\delta, n''\delta). \tag{19}$$

Соответствующие графики и численные оценки представлены на рис. 5, 6. Вычисляя значения Q

по формуле (18) и сравнивая их с калибрационными оценками Q_{cal}, полученными с помощью (20) при больших значениях $N_\delta \sim 100$ (в нашем численном эксперименте $N_\delta = 128$), получим калибрационные кривые относительных погрешностей

$$\sigma = \frac{|Q(n) - Q_{cal}|}{Q_{cal}} \times 100\% \qquad (20)$$

исследуемого ГЧ-модуля для различных гидродинамических режимов потока.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически исследована методика обработки данных в ультразвуковых измерительных модулях, позволяющая получать прецизионные оценки величин расхода жидкости или газа, транспортируемых по трубопроводу, на основании дифференциальных измерений времен пролета ультразвуковых сигналов в нескольких измерительных плоскостях. Рассмотрен случай безвихревого движения в канале. Представлены результаты численного моделирования, подтверждающие полученные теоретические результаты.

Отметим два обстоятельства, связанные с развитием данной методики измерений и особенностями процедур обработки измерительных данных.

Во-первых, стандартный измерительный ГЧ-модуль в силу строго определенной ориентации и положения измерительных плоскостей в канале не является чувствительным к вихревым и прочего рода вращательным движениям в исследуемом объеме. Повышение информативности ультразвуковых измерений можно, однако, достичь либо выполнением дополнительных томографических измерений [11–13], либо применяя модифицированные ГЧ-измерительные модули, обеспечивающие возможность дополнительных межплоскостных измерений, что позволяет, в свою очередь, использовать современные математические методы компьютерной реконструкции функций (в данном случае, формы аксиального профиля скорости, завихренности, распределения плотности, температуры и т.д.) по ограниченному набору их косвенных интегральных оценок. Первый подход сложнее с точки зрения его практической реализации, во втором случае возникает задача совместной трехмерной реконструкции скалярной функции пространственной переменной и векторного поля скоростей, составляющая предмет специального исследования (аналогично [14, 15]).

Полученные численные результаты соответствуют профилю скорости, описываемому достаточно простым аналитическим выражением. Очевидно, тем не менее, что компьютерное моделирование жидких и газообразных потоков для различных гидродинамических режимов с использованием современных ВДЖ-технологий может стать эффективным инструментом проектирования измерительных модулей данного типа.

Приложение

ОСНОВНЫЕ КВАДРАТУРНЫЕ ФОРМУЛЫ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Построение квадратурных сумм, аппроксимирующих искомый интеграл, сводится к суммированию значений подынтегральных выражений, вычисленных в специальных точках области интегрирования (узлах) и умноженных на соответствующие веса.

При равноотстоящих узловых точках получаются формулы, называемые формулами Ньютона–Котеса (табл. 1):

$$\int_a^b f(\tau)d\tau = \frac{n\delta}{P_n}\sum_{j=0}^{n} f(a + j\delta)p_{jn} + R_n[f],$$
$$P_n = \sum_{j=0}^{n} p_{jn}, \quad \delta = \frac{b-a}{n}, \quad a = \tau_0, \quad b = \tau_n. \qquad (П.1)$$

Таблица 1. Значения числовых параметров в формулах Ньютона–Котеса

n	P_n	p_{0n}	p_{1n}	p_{2n}	p_{3n}	p_{4n}	p_{5n}	p_{6n}	p_{7n}	$R_n[f]$
1[a]	2	1	1							$-8.(3) \times 10^{-2}\,\delta^3 \times f^{(4)}(\tau)$
2[b]	6	1	4	1						$-1.(1) \times 10^{-2}\,\delta^5 \times f^{(4)}(\tau)$
3[c]	8	1	3	3	1					$-3.750 \times 10^{-2}\,\delta^5 \times f^{(4)}(\tau)$
4	90	7	32	12	32	7				$-8.465 \times 10^{-3}\,\delta^7 \times f^{(6)}(\tau)$
5	288	19	75	50	50	75	19			$-2.273 \times 10^{-2}\,\delta^7 \times f^{(6)}(\tau)$
6	840	41	216	27	272	27	216	41		$-6.429 \times 10^{-3}\,\delta^9 \times f^{(8)}(\tau)$
7	17280	751	3577	1323	2989	2989	1323	3577	751	$-1.579 \times 10^{-2}\,\delta^9 \times f^{(8)}(\tau)$

[a] Формула трапеции
[b] Формула парабол (Симпсона)
[c] Формула Ньютона.

Таблица 2. Значения τ_j и c_j в формулах Гаусса

n	j	x_j	$\frac{1}{2}c_j$	R_n
1	1	0.000	1.000	$3.(3)\times10^{-1}\times f^{(2)}(\xi)$[a]
2	1.2	±0.577	1/2	$7.407\times10^{-3}\times f^{(4)}(\xi)$
3	1.3	±0.775	5/18	$6.349\times10^{-5}\times f^{(6)}(\xi)$
	2	0.000	4/9	
4	1.4	±0.861	0.174	$2.879\times10^{-7}\times f^{(8)}(\xi)$
	2.3	±0.340	0.326	
5	1.5	±0.906	0.118	$8.079\times10^{-10}\times f^{(10)}(\xi)$
	2.4	±0.538	0.239	
	3	0.000	0.284	
6	1.6	±0.932	0.086	$1.541\times10^{-12}\times f^{(12)}(\xi)$
	2.5	±0.661	0.180	
	3.4	±0.239	0.234	
7	1.7	±0.949	0.065	$2.105\times10^{-15}\times f^{(14)}(\xi)$
	2.6	±0.742	0.140	
	3.5	±0.406	0.191	
	4	0.000	0.209	

[a] $f^{(n)}$ – n-я производная функции $f(\xi)$.

Вместо того, чтобы априори задавать положения точек, в которых вычисляется функция $f(\tau)$, как это делается в методе Ньютона–Котеса, можно изначально определить координаты этих точек таким образом, чтобы аппроксимация давала точное значение интеграла каждый раз, когда $f(\tau)$ – многочлен степени не выше p, где $p(\le n)$ также подлежит определению.

Наиболее известной реализацией такого подхода является квадратура Гаусса:

$$\int_{1}^{+1} f(\tau)d\tau = \sum_{j=1}^{n} c_j^{(n)} f(\tau_j) + \frac{2^{2n+1}(n!)^4}{[(2n)!]^3 2n+1} f^{(2n)}\tau. \qquad (\text{П}.2)$$

Значения τ_j и c_j в (П.2) приведены в табл. 2.

Высокоточные вычислительные процедуры реализуются также для случая, когда в подынтегральном выражении присутствует некоторая весовая функция $w(\tau)$. Для специальных весовых функций и нормированного отрезка [–1, +1] известны соответствующие ортогональные многочлены. Например, для

$$w(\tau) = \frac{1}{\sqrt{1-\tau^2}}$$

это многочлены Чебышева

$$T_n(\tau) = \cos(n\arccos\tau). \qquad (\text{П}.3)$$

Если узловые точки выбраны таким образом, что

$$\tau_j = \cos\frac{2j-1}{2n}\pi,$$

то соответствующая формула численного интегрирования (формула Эрмита) будет иметь вид

$$\int_{-1}^{+1}\frac{f(\tau)}{\sqrt{1-\tau^2}}d\tau = \frac{\pi}{n}\sum_{j=1}^{n} f(\tau_j) + \frac{f^{(2n)}}{(2n)!}\int_{-1}^{+1}\frac{T_n^2(\tau)d\tau}{2^{2n-2}\sqrt{1-\tau^2}}. \qquad (\text{П}.4)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lynnworth L.C.* Ultrasonic measurements for process control. N.Y.: Academic Press, 1989. 720 p.
2. *Merzkirch W.* Flow Visualization. N.Y.: Academic Press, 1987. 260 p.
3. *Хамидуллин В.К.* Ультразвуковые контрольно-измерительные устройства и системы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 245 с.
4. *Fisher S.G., Spink P.G.* Ultrasonics as a standard for volumentric flow measurement // Modern Developments in Flow Measurement, (Clayton C.G. ed). Peregrinus, 1972.
5. *Hilgenstock A., Heinz M., Nath B.* Numerical flow simulation as a tool for developing and calibrating ultrasonic flow meters // Proc. 8th Int. Conf. of Flow Measurement. FLOMEKO'96. Oct. 20–24. 1996. Beijing, China. P. 1–6.
6. *van Bloemendal K., van der Kam P.M.A.* Installation effects on multi-path ultrasonic flow meters: the 'Ultraflow' Project // Fluid Flow Measurement. 3th Intern. Symp. San. Antonio, Texas. 1995.
7. *Lynnworth L.C., Jossinet G., Cherifi E.* 300° clamp-on ultrasonic transducers for measuring water flow and level // Proc. 1996. IEEE Ultrasonics Symposium. IEEE Press. 1996. P. 407–412.
8. *Крылов В.И.* Приближенное вычисление интегралов. М.: Наука, 1967.
9. *Schlichting H.* Boundary layer theory. N.Y.: McGraw-Hill, 6th Edition, 1968.
10. *Fleury G.* Reconstruction de profils de vitesse a partir de donnees lacunaires et optimisation d'instrument – Application a la débimetrie ultrasonore. Dissertation, Orsay, France: Universite de Paris-Sud, Ecole Superieure d'Electricite. 1994.
11. *Braun H., Hauck A.* Tomographic Reconstruction of Vector Fields // IEEE Transactions on Signal Processing. 1991. V. 39. № 2. P. 464–471.
12. *Rychagov M.N., Ermert H.* Cross-flow vizualization by acoustic CT measurements // Ultrasonics. Special Issue (UK). 1996. V. 34. P. 517–522.
13. *Rychagov M.N., Ermert H., Nabokov R.* Reconstruction of inhomogeneous quasisteady flows and vortices by

methods of acoustic tomography // Process Tomography-95. Implementation for industrial processes / Ed. by M.S. Beck, N.Y.: UMIST Press, 1995. P. 196–204,

14. *Johnson S.A., Greenleaf J.F., Tanaka M., Flandro G.* Reconstructing three-dimensional fluid velocity vector and temperature fields from acoustic transmission measurements // Proc. Symp. on flow in open channels and closed conduits, MD: Geithersburg. February 23–25. 1977. P. 335–359.

15. *Hoefelmann G.* Reconstructing temperature and velocity from feilds of fire induced smoke // Acoustical Imaging, Plenum Press. 1993. V. 20. P. 193–200.

Ultrasonic Flow Measurements by Multipath Measuring Spoolpieces

M. N. Rychagov

The problems of optimization and increase of informative capacity of ultrasonic flow measurements in industrial systems of liquid and gas transportation are considered. The measuring technique is based on the use of specialized multisensor measuring flowcells. The design and equipment of these flowcells are oriented at the high-precision measurement of time-of-flight differences of acoustic signals in several parallel measuring planes. The positions of measuring planes relative to the axis of the transporting channel are determined by the choice of the procedures of numerical integration of the axial velocity profile with the integral relations being replaced by the appropriate quadrature formulas. The technique of multipath evaluation of cross-flow velocity profile and the formation of flow rate estimates in cylindrical channels of liquid and gas transportation are demonstrated and analyzed by using the so-called Gauss–Chebyshev measuring technique (GC-measuring spoolpiece).