УДК 681.121.89.082.4 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-106-116

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВЕКТОРНОМ ОДНОЛУЧЕВОМ АКУСТИЧЕСКОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ

А.Н. Греков, Н.А. Греков, С.С. Пелюшенко

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: i@angrekov.ru

Рассмотрены акустические измерители скорости и направления течения из серии ИСТ, которые могут встраиваться в различные измерительные системы. Проведено моделирование профиля течения в измерительной трубе в зависимости от скорости набегающего потока. Разработан метод измерения, в котором используется время прохождения повторных отраженных от преобразователей акустических сигналов, что позволяет учитывать временные аппаратные задержки и изменение длины измерительной базы, влияющие на определение скорости звука и течения, при этом повышается точность измерения параметров скорости звука при одновременном измерении скорости течения и температуры для жидких сред с различной плотностью.

Ключевые слова: скорость звука, профиль скорости течения, погрешность, моделирование, измерение, акустический прибор

Поступила в редакцию: 20.07.2022. После доработки: 30.08.2022.

Введение. Основные требования к гидрологическим акустическим измерителям течений – это универсальность прибора (способность работать в морских и речных условиях), а также преемственность методик измерения и постановок приборов на гидроузлах, которые формировались десятилетиями. Поэтому без учета этих требований корректно стыковать результаты новых измерений с архивными базами данных окажется невозможным из-за различий динамических характеристик, временного и пространственного усреднения.

Учитывая вышеизложенные требования, взамен гидрометрических вертушек, выпускаемых в России, или аналогичных – выпускаемых за рубежом Valeport-106, -108, -308 (гидрологические вертушки), были разработаны акустические измерители скорости течения серии ИСТ [1, 2], которые предназначены для измерения скорости течения, направления течения, температуры и гидростатического давления (глубины) воды в любых водотоках с берега, береговых сооружений, мостов и плавсредств. Прибор векторного типа ИСТ-1М был разработан и изготовлен на базе существующего прибора ИСТ-1, технические характеристики и область применения которого опубликованы в работах [3, 4]. ИСТ-1М кроме измерения скорости и направления течения, температуры и глубины, имеет возможность измерять не только углы наклона прибора, но и, в отличие от зарубежных аналогов, собственные движения по показаниям установленных в них акселерометров.

Разработанная серия акустических приборов ИСТ может встраиваться в измерительные системы на научно-исследовательских судах; судах наблюдений для проведения регулярных метеорологических или океанографических измерений; автономных подводных аппаратах для проведения обследований и океанографических исследований; аппаратах с переменной глубиной буксировки – несущие большое количество датчиков, анализаторов и устройств для отбора проб; заякоренных буях, которые размещаются на континентальном шельфе, устройствах, заякоренных на морском дне, которые используются для мониторинга процессов вблизи морского дна; дрейфующих буях (дрифтеры) для коррекции относительного вектора скорости течения от воздействия ветровой компоненты; притопленных буях, кото-

рые представляют собой автономные платформы, свободно дрейфующие на глубине и всплывающие время от времени для передачи данных.

Точность этих средств измерения ограничена влиянием на результат измерения временных задержек сигналов в передающих и приемных трактах, включая задержки в акустических преобразователях, которые существенно зависят от температуры и давления, и изменяются со временем. Кроме того, в результат измерения входит скорость звука в среде, которую определяют с ограниченной точностью из-за тех же задержек сигналов в приемо-передающих трактах.

В связи с тем, что в однолучевом акустическом измерителе скорости течения, скорость распространения звука в водной среде взаимосвязана со скоростью течения, также необходимо рассмотреть и измерение скорости течения.

Основная часть. Известно, что ультразвуковая волна несет информацию о скорости течения, когда она распространяется в текучей жидкости. Скорость можно определить, измерив время распространения ультразвуковой волны. Принцип используемых сегодня ультразвуковых измерителей со временем прохождения был основан на том, что скорость равномерна на пути распространения ультразвуковой волны. Измерительный канал скорости звука и течения является каналом акустического типа с двумя пьезопреобразователями (*A*, *B*), расположенными в измерительной трубе прибора с диаметром *D* (рис. 1).

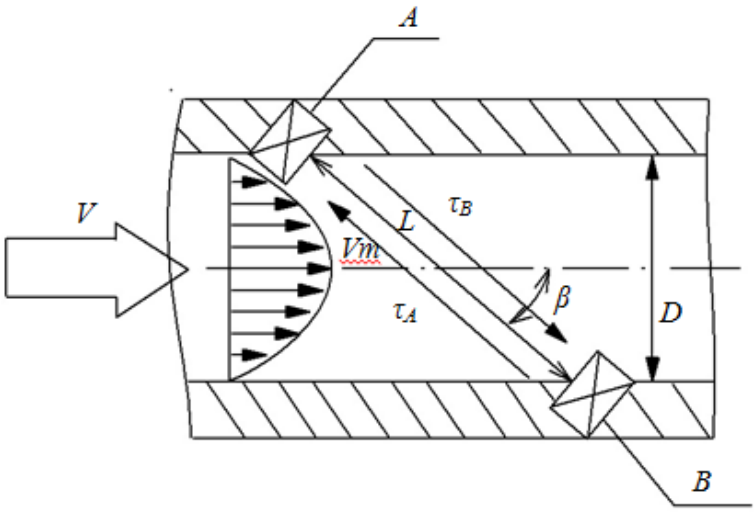

Рис. 1. Функциональная схема измерительной трубы акустического прибора
Fig. 1. Functional diagram of the measuring tube of an acoustic instrument

Сформированный электрический импульс последовательно подается на пьезопреобразователи *A* и *B*, где преобразуется в акустический сигнал, который проходит через жидкость и вновь принимается этими пьезопреобразователями.

Учитывая, что пьезопреобразователи располагаются в канале диаметром *D* под некоторым углом β, уравнения для времени распространения ультразвуковых импульсов по направлению движения жидкости τ_A и против него τ_B запишутся как

$$\tau_A = \frac{D/\sin\beta}{C + V\cos\beta}\ ,\quad \tau_B = \frac{D/\sin\beta}{C - V\cos\beta}, \qquad (2)$$

где V – скорость потока жидкости; C – скорость звука в воде.

С некоторыми допущениями, а, именно, что профиль скорости течения в акустическом измерительном канале однороден и, исключая временные задержки и скорость распространения звука C, с учетом, что $C>>V$ из выражения (2), окончательно упрощенное выражение для определения скорости течения можно записать как

$$V = \frac{D\left(\tau_A - \tau_B\right)}{\tau_A \tau_B \sin 2\beta}. \qquad (3)$$

Однако хорошо известно, что профиль скорости течения в акустическом измерительном канале неоднороден как при ламинарном, так и при турбулентном течении [5–7]. Анализ известных работ [8] показал, что существует ограниченное количество доступной информации о влиянии профиля скорости на неопределенность измерения. Iooss B. и др. в [9] доказали, что скорость потока завышена из-за предположения о равномерной скорости распределения, а поправочный коэффициент получается эмпирически по результатам численного моделирования для полностью развитой турбулентности. Hui Zhang и др. в [10] дал поправочный коэффициент для переходной области с числом Рейнольдса в диапазоне 2000–20000 на основе результатов эксперимента Particle. Недостаточно исследован поправочный коэффициент для времени прохождения путем теоретического анализа. В статье [11] теоретически и экспериментально рассмотрено влияние профилей скорости поперек акустического измерительного канала на время распространения ультразвуковой волны. Предложены теоретические поправочные коэффициенты для повышения точности измерений. Для ламинарного потока поправочный коэффициент равен 0,75. Для турбулентного потока поправочный коэффициент зависит от числа Рейнольдса, а экспериментальные результаты показали, что предложенные поправочные коэффициенты хорошо согласуются с теоретическими поправочными коэффициентами и их средняя относительная ошибка определена как 0,976% для ламинарного потока и 0,25% для турбулентного потока.

Воспользоваться этими результатами для нашего случая не представляется возможным, так как в известных работах не учитывается влияние конфузора, ограниченность длины измерительного канала и косоструйность течения. Отметим, что измерительный акустический канал приборов ИСТ отличается своей особенностью, которая заключается в том, что помимо измерительной трубы, имеющей определенный внутренний диаметр и привязанный к габаритам всего прибора, еще имеется конфузор, обеспечивающий малое лобовое сопротивление и хорошую протекаемость в диапазоне скоростей до 5 м/с при внешних давлениях порядка 10 МПа. В совокупности габариты разработанного прибора не превышают размеры механических вертушек, что позволяет использовать его для измерения течений, начиная с глубин 5 см.

Разработка прибора была произведена с использованием пакета программ AutoCAD [12]. На рис. 2 представлен общий вид прибора. Диаметр измерительной трубы и угол раскрытия конфузора для конкретного измерителя определялись в результате моделирования на интегрированных CAD и CAE системах, в частности приложения COSMOSFloWorks пакета SolidWorks [13], которые также использовались для исследования полей скорости течения и давления при обтекании приборов серии ИСТ.

Одно из исследований, проводимых в приложении COSMOSFloWorks пакета SolidWorks с измерителем скорости течения ИСТ-1, это моделирование профиля течения в измерительной трубе и определение погрешности от косоструйности в диапазоне углов от 0° до 30° и сравнение результатов с погрешностями механических вертушек.

Математическая модель расчетной области представляла собой параллелепипед с габаритными размерами *l*x*b*x*h* = 0,5 x 0,4 x 0,4 м^3.

Чтобы оценить точность полученного решения поставленной математической задачи, проводились несколько расчетов на разных расчетных сетках, отличающихся размером и, соответственно, количеством ячеек. Было получено, что, начиная с определенной частоты сетки, решение задачи перестало значимо зависеть от частоты сетки, т.е. вышло на «полку», что указало на то, что необходимая точность решения математической задачи достигнута, так как получена сеточная сходимость решения математической задачи.

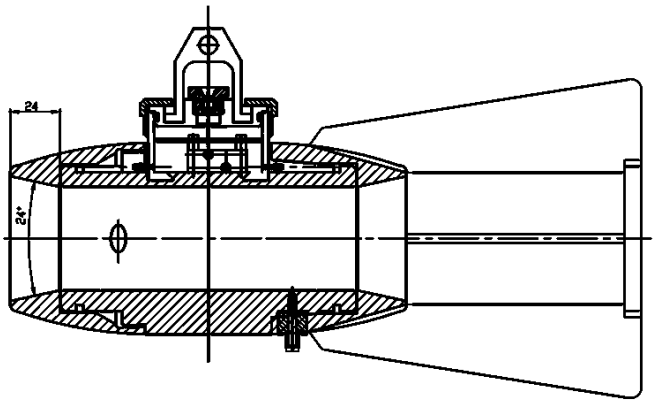

Рис. 2. Общий вид прибора
Fig. 2. General view of the device

Таким образом, моделирование с помощью COSMOSFloWorks заключалось в проведении при фиксированных значениях модели, расчетной области, граничных и начальных условиях выполнения, нескольких расчетов с варьированием расчетной сетки. Определение точности полученного решения.

На рис. 3 представлены результаты моделирования потока в приборе ИСТ-1 при скорости течения 1 м/с. Затем, используя полученные профили скорости течения, определялась средняя скорость течения $\bar{V}$ между двумя пьезоизлучателями A и B, расположенными на расстоянии L:

$$V = \frac{1}{L}\int_0^L V(L)dL.$$

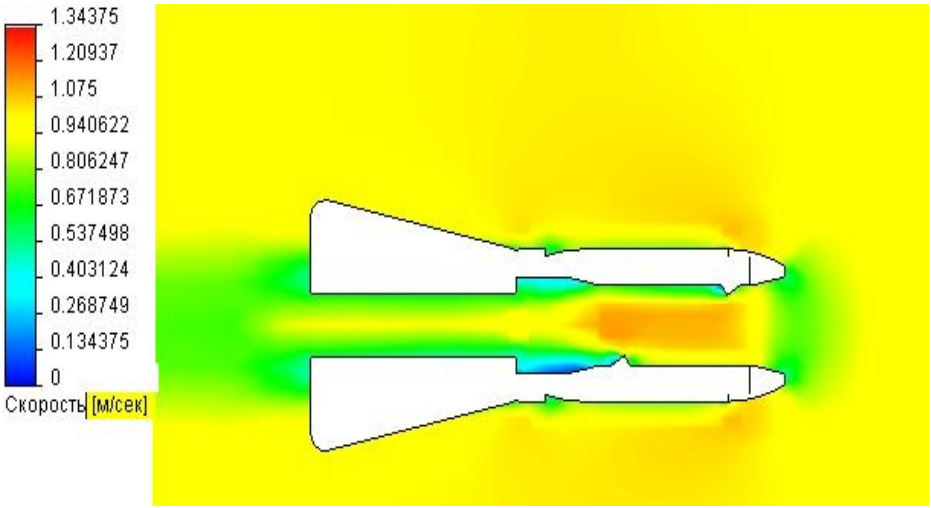

Рис. 3. Поле скорости течения, результаты моделирования потока в приборе ИСТ-1 при скорости течения 1 м/с
Fig. 3. Flow velocity field, results of flow simulation in the IST-1 device at a flow speed of 1 m/s

Для анализа результатов моделирования были построены профили скорости течения в измерительной трубе в зависимости от скорости набегающего потока с дискретностью 1 м/с и максимальной скоростью 5 м/с. На рис. 4 представлен график профиля скорости течения в акустическом канале прибора ИСТ-1 при скорости течения 2 м/с и нулевой косоструйностью.

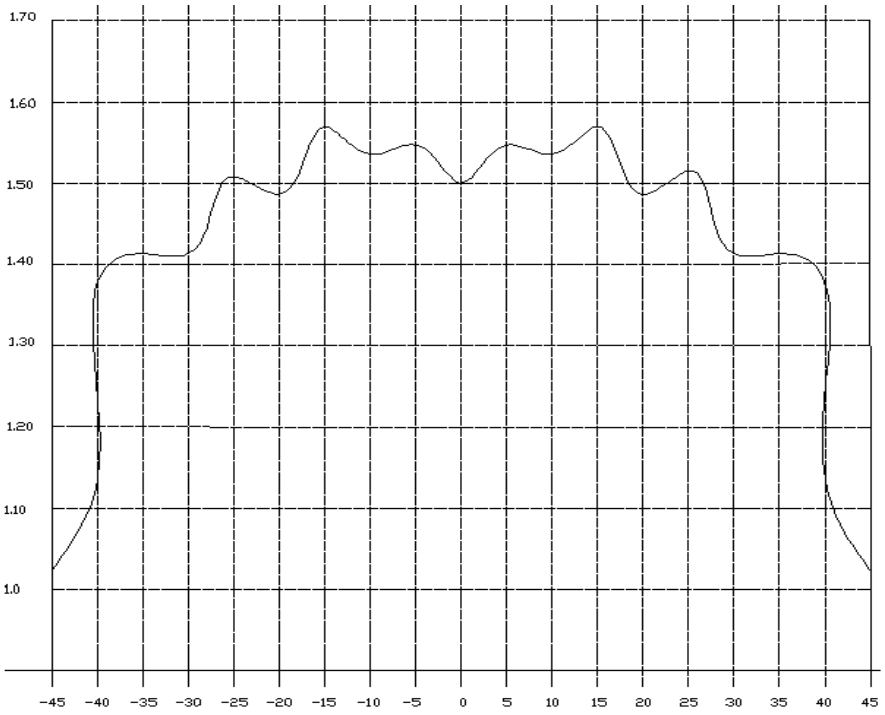

Рис. 4. График профиля скорости течения в акустическом канале прибора ИСТ-1 при скорости течения 2 м/с и нулевой кососструйностью
Fig. 4. Graph of the flow velocity profile in the acoustic channel of the IST-1 instrument at a flow rate of 2 m/s and zero skew

Неравномерность профиля скорости течения (см. рис. 4) в измерительном канале прибора вызвана ограниченным сечением гидролотка, стенки которого при моделировании были расположены на расстоянии 0,15 м друг от друга. При увеличении сечения до 0,5 м пики на диаграмме уменьшались и для открытого бассейна не проявлялись.

Далее, изменяя положение прибора относительно вектора скорости набегающего потока в горизонтальной и вертикальной плоскости с дискретностью 5°, строились профили скоростей течения в измерительном канале прибора. На рис. 5 представлено поле скорости течения, результаты моделирования потока в приборе ИСТ-1 при скорости течения 1 м/с.

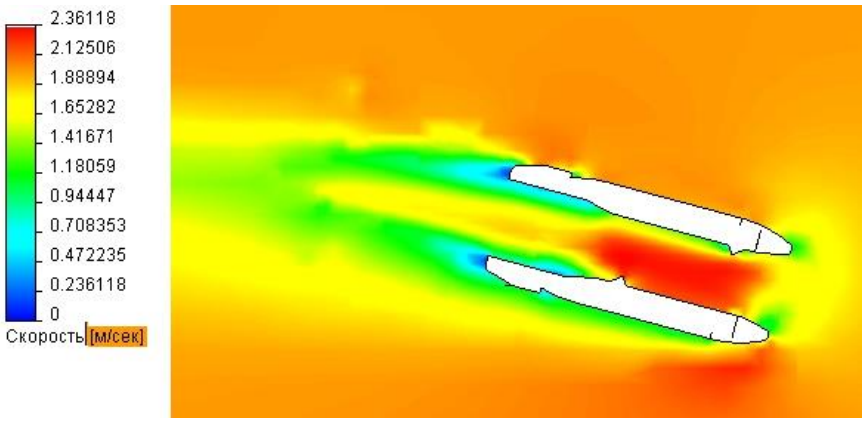

Рис. 5. Результаты моделирования потока скоростей с моделью прибора ИСТ-1 при его наклоне на 15° и скорости течения 2 м/с
Fig. 5. The results of modeling the flow of velocities with the model of the IST-1 device with its inclination by 15° and flow velocity of 2 m/s

По результатам моделирования (см. рис. 5) был построен график профиля скорости течения, проходящего между двумя пьезоизлучателями *A* и *B*, расположенными на расстоянии L и наклоне прибора ИСТ-1 на 15° и скорости течения 2 м/с, который представлен на рис. 6.

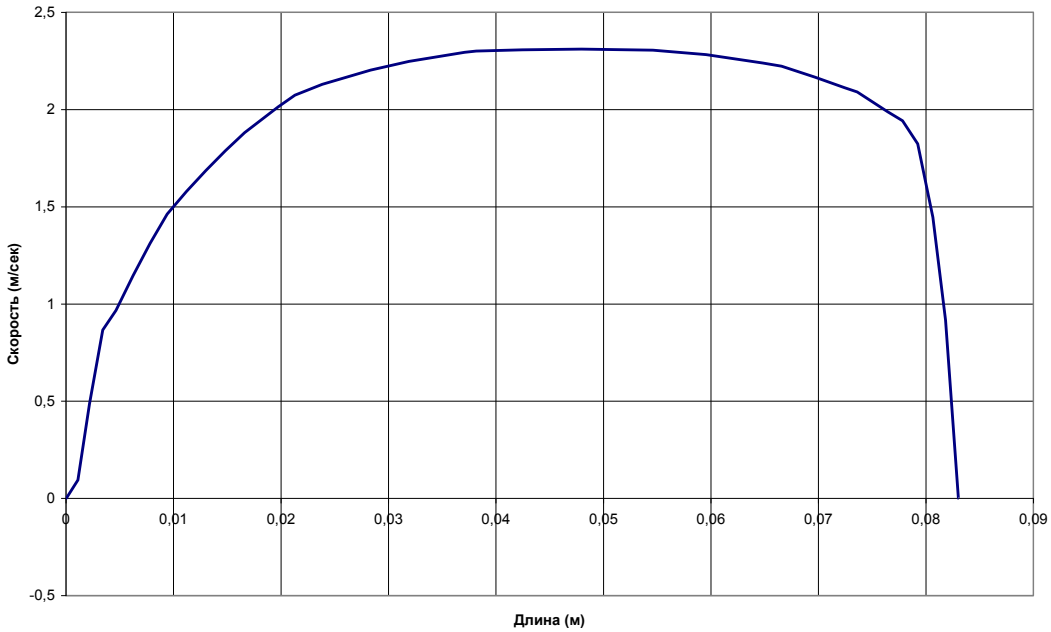

Рис. 6. График профиля скорости течения проходящего между двумя пьезоизлучателями *A* и *B*, расположенными на расстоянии L и наклоне прибора ИСТ-1 на 15° и скорости течения 2 м/с
Fig. 6. Graph of the profile of the flow velocity passing between two piezo emitters *A* and *B*, located at a distance and inclination of the IST-1 device by 15° and a flow velocity of 2 m/s

Как следует из результатов моделирования величина скорости потока в профиле $V = \frac{1}{L}\int_0^L V(L)dL$, $V(L)$ имеет нелинейный характер и зависит от скорости набегающего потока и его косоструйности. Для данного исследования было построено 50 графиков скорости набегающего потока с дискретностью 1 м/с при скоростях потока до 5 м/с с изменением положения прибора относительно вектора набегающего потока в горизонтальной и вертикальной плоскости с дискретностью 5°.

В результате моделирования было определено, что при косоструйности более 35° начинается резкое падение средней скорости течения между излучателями прибора относительно величины набегающего потока, что приводит к значительным погрешностям измерителя ИСТ-1 по скорости. Аналогично для гидродинамических вертушек резкий спад начинается после 30°. Все полученные данные моделирования дополнительно подтверждены в результате натурных испытаний в гидродинамическом лотке.

Из этих исследований следует, что создать математическую модель для расчета скорости течения с учетом всех влияющих факторов и с приемлемой точностью не представляется возможным. Поэтому величины τ_A и τ_B в уравнении (3) определялись в натурных условиях по результатам градуировки, проведенной на специальном гидродинамическом лотке.

Теперь рассмотрим метод повышения точности измерения скорости звука при прохождении акустических сигналов в измерительном канале прибора с учетом задержек. Структурная схема акустического измерительного канала с задержками представлена на рис. 7.

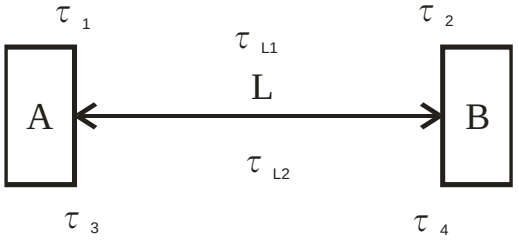

Рис. 7. Структурная схема акустического измерительного канала с задержками
Fig. 7. Structural diagram of an acoustic measuring channel with delays

Здесь *A* и *B* – акустические пьезопреобразователи, расположенные в измерительной трубе на расстоянии *L*.

Каждый из пьезопреобразователей имеет задержку сигнала при передаче τ_1 и τ_3 и при приеме – τ_2 и τ_4. Время прохождения акустического сигнала от преобразователя *A* к преобразователю *B*:

$$\tau_A = \tau_1 + \tau_{L1} + \tau_2, \qquad (4)$$

от преобразователя *B* к преобразователю *A*:

$$\tau_B = \tau_3 + \tau_{L2} + \tau_4, \qquad (5)$$

где $\tau_{L1} = L/(C+V)$ и $\tau_{L2} = L/(C-V)$.

Дополнительно при излучении преобразователем *A* принимаем этим же преобразователем отраженный от преобразователя *B* сигнал

$$\tau_{A0} = \tau_1 + \tau_{L1} + \tau_{L2} + \tau_3. \qquad (6)$$

При излучении преобразователем *B* и приеме им отраженного сигнала

$$\tau_{B0} = \tau_4 + \tau_{L2} + \tau_{L1} + \tau_2. \qquad (7)$$

Сумму времен сигналов τ_A и τ_B можно записать как:

$$\tau_A + \tau_B = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \frac{L}{C+V} + \frac{L}{C-V}, \qquad (8)$$

$$C = \frac{L \pm \sqrt{L^2 + \Delta\tau^2 V^2}}{\Delta\tau}, \qquad (9)$$

где $\Delta\tau = \tau_{A0} + \tau_{B0} - \tau_A + \tau_B -$ величина разностного сигнала в измеряемой жидкости.

При воздействии на измерительный канал температуры *T*, уравнение запишем как:

$$C(T) = \frac{L(T) \pm \sqrt{L^2(T) + \Delta\tau^2 V^2}}{\Delta\tau}. \qquad (10)$$

Длина измерительной базы для конкретной температуры *T* определяется из уравнения

$$L(T) = C_\partial(T)\Delta\tau_\partial,$$

где $\Delta\tau_д(\mathrm{T}) = \tau_{\mathrm{A0}} + \tau_{\mathrm{B0}} - \tau_{\mathrm{A}} - \tau_{\mathrm{B}}$, $C_\partial(T)$ – зависимость скорости звука от температуры в дистиллированной воде. Для расчетов используют известное уравнение пятого порядка [14] зависимости скорости звука от температуры со стандартным отклонением 0,0028 м/с для 148 наблюдений между 0,001 и 95,126°C по шкале Т68. Считается, что точность уравнения составляет 0,015 м/с, а воспроизводимость повторений составляет 0,005 м/с.

$$C_\partial(T) = 1{,}40238744\cdot10^3 + 5{,}03836171\cdot\mathrm{T} - 5{,}81172916\cdot10^{-2}\cdot\mathrm{T}^2 + 3{,}34638117\cdot10^{-4}\cdot\mathrm{T}^3 - 1{,}48259672\cdot10^{-6}\cdot\mathrm{T}^4 + 3{,}16585020\cdot10^{-9}\cdot\mathrm{T}^5.$$

Методически работа заключалась в следующем: прибор серии ИСТ помещался в термостат с дистиллированной водой, где контролировалась температура T образцовым термометром LTA/БЭ 69551-17 дополнительно осуществлялся контроль температуры внутренним измерительным каналом, расположенным в приборе. Одновременно регистрировались временные задержки сигналов при фиксированных значениях температуры, получаемые от микроконтроллера, встроенного в структуру прибора, затем вычислялись значения задержек τ_{A0i}, τ_{B0_i}, τ_{A_i}, τ_{B_i} как функция $f(T_i)$. По полученным значениям определялась зависимость длины измерительной базы L от температуры T, которая аппроксимировалась полиномом. График приращения длины измерительной базы ΔL от температуры T представлен на рис. 8.

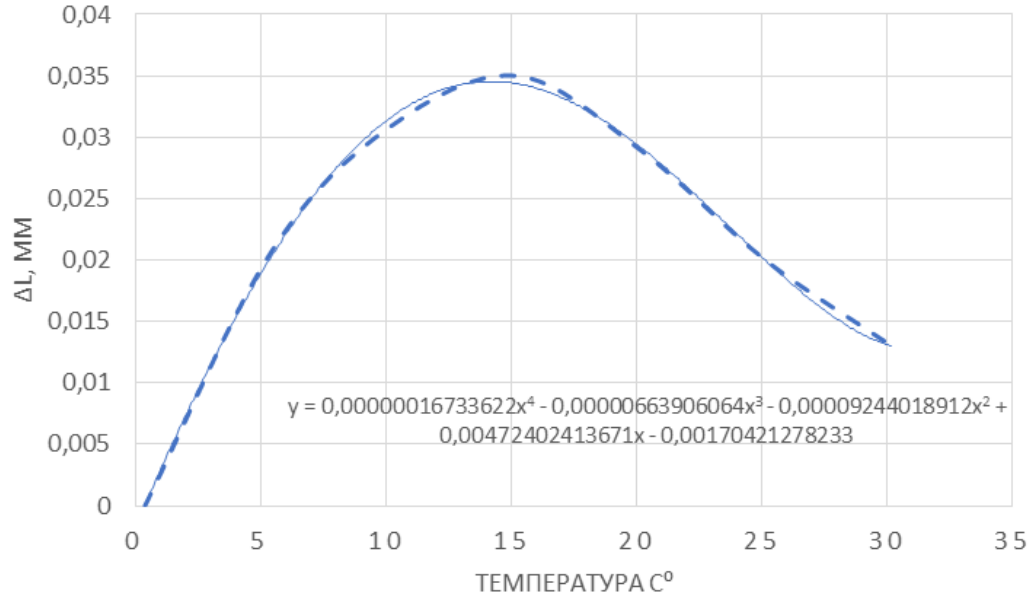

Рис. 8. Зависимость приращения длины измерительной базы ΔL от температуры T
Fig. 8. Dependence of the length increment of the measuring base ΔL on temperature T

Для автоматизации процесса измерения приведенная кривая (рис. 8) аппроксимировалась полиномом

$$y = 0{,}00000016733622x^4 - 0{,}00000663906064x^3 - 0{,}00009244018912x^2 + 0{,}00472402413671x - 0{,}00170421278233.$$

Оценим влияние скорости течения V на погрешность измерения скорости звука C, при условии, что все временные задержки сигналов в передающих и приемных трактах, включая задержки в акустических преобразователях, и изменение длины измерительной базы учтены по представленной выше методике. Для расчета используем уравнение (9). В результате расчета получен график зависимости приращения скорости звука ΔC от скорости течения V, который представлен на рис. 9.

Из графика (рис. 9) видно, что теоретически максимальная ошибка по скорости звука не превышает 1,6 мм/с для данной конструкции прибора в океанографическом диапазоне изменения скорости звука и в диапазоне скоростей 0–5 м/с.

Таким образом, предложенный метод позволяет обеспечить повышенную точность измерения скорости звука при одновременном измерении скорости течения и температуры для жидких сред с различной плотностью.

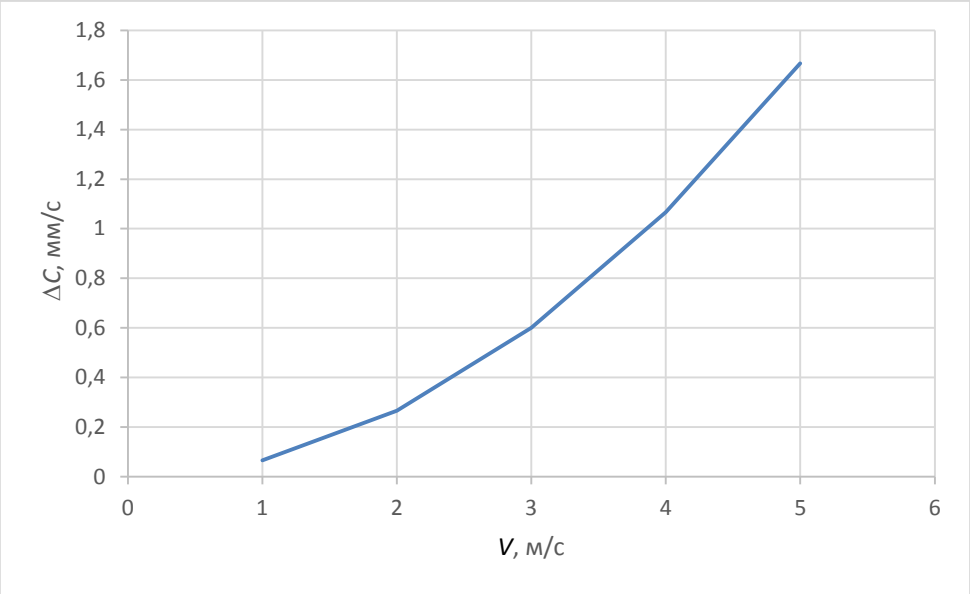

Рис. 9. График зависимости приращения скорости звука от скорости течения
Fig. 9. Graph of the increase in the speed of sound from the speed of the current

Выводы. Разработан метод измерения, в котором используется время прохождения повторных отраженных от преобразователей акустических сигналов, что позволяет учитывать временные аппаратные задержки и изменение длины измерительной базы, влияющие на определение скорости звука и течения, при этом повышается точность измерения параметров скорости звука при одновременном измерении скорости течения и температуры для жидких сред с различной плотностью.

Проведено моделирование профилей скорости течения в измерительной трубе прибора с конфузором в зависимости от кососструйности и скорости набегающего потока, с дискретностью 1 м/с и максимальной скоростью 5 м/с.

Выполнен анализ профилей скорости течения, полученных между двумя пьезоизлучателями, расположенными на расстоянии L, из чего следует, что создать математическую модель для расчета скорости течения с учетом всех влияющих факторов и с приемлемой точностью не представляется возможным. Поэтому величины задержек необходимо определять в натурных условиях, используя результаты градуировки, проведенной на специальном гидродинамическом лотке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Греков Н.А., Гайский П.В., Мишуров В.Ж., Бондаренко А.С.* Переносной измеритель скорости течения ИСТ-1 // Системы контроля окружающей среды. Средства и мониторинг. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. С. 35–40.

2. *Греков Н.А., Греков А.Н., Даниленко М.Я., Жемков Е.И.* Исследование акустического канала измерителя скорости течения // Системы контроля окружающей среды. Средства, модели и мониторинг. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. С. 28–31.

3. *Алексеев С.Ю., Греков А.Н.* Акустический измеритель скорости и направления течения ИСТ-1М речного и морского назначения // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. С. 77–82.

4. *Греков А.Н., Греков Н.А.* Измерители скорости течений для морских и речных условий ИСТ-1 и ИСТ-1М // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 2. С. 77–84.

5. *Mandard E., Kouame D., Battault R., Remenieras J.P., Patat F.* Transit time ultrasonic flowmeter: Velocity profile estimation // Ultrasonics. 2005. Vol. 2. P. 763–766.

6. *Willatzen M., Kamath H.* Nonlinearities in ultrasonic flow measurement // Flow Meas. Instrum. 2008. Vol. 19. P. 79–84.

7. *Rajita G., Mandal N.* Review on transit time ultrasonic flowmeter // In Proceedings of the International Conference on Control, Kolkata, India, 28–30 January 2016.

8. *Lynnworth L.C., Liu Y.* Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005 // Ultrasonics. 2006. Vol. 44. P. E1371–E1378.

9. *Iooss B., Lhuillier C., Jeanneau H.* Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters: Uncertainties due to flow profile and fluid turbulence // Ultrasonics. 2002. Vol. 40 (9). P. 1009–1015. DOI: 10.1016/s0041-624x(02)00387-6

10. *Hui Zhang, Chuwen Guo, Jie Lin.* Effects of Velocity Profiles on Measuring Accuracy of Transit-Time Ultrasonic Flowmeter // Appl. Sci. 2019. Vol. 9. P. 1648. DOI:10.3390/app9081648

11. *Liu Z.G., Du G.S., Shao Z.F., He Q.R., Zhou C.L.* Measurement of transitional flow in pipes using ultrasonic flowmeters // Fluid Dyn. Res. 2014**.** Vol. 46 (5). P. 055501.

12. www.autodesk.ru/autocad

13. www.solidworks.ru

14. *Del Grosso V.A., Mader C.W.* Speed of sound in pure water // The Journal of the Acoustical Society of ca. 1972. Vol. 52. P. 1442. https://doi.org/10.1121/1.1913258

INCREASING THE ACCURACY OF SOUND VELOCITY MEASUREMENT IN A VECTOR SINGLE-BEAM ACOUSTIC CURRENT VELOCITY METER

A.N. Grekov, N.A. Grekov, S.S. Peliushenko

Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28
E-mail: i@angrekov.ru

Acoustic flow velocity and direction meters from the IST series, which can be integrated into various measuring systems, are considered. The simulation of the flow profile in the measuring tube was carried out depending on the free flow velocity. A measurement method has been developed that uses the transit time of repeated acoustic signals reflected from the transducers, which makes it possible to take into account time hardware delays and a change in the length of the measuring base, which affect the determination of the speed of sound and flow, while increasing the accuracy of measuring the sound speed parameters with simultaneous measuring the flow velocity and temperatures for liquid media of different densities.

Keywords: sound speed, flow velocity profile, error, modeling, measurement, acoustic device

REFERENCES

1. *Grekov N.A., Gaisky P.V., Mishurov V.Zh., and Bondarenko A.S.* Perenosnoy izmeritel' skorosti techeniya IST-1 (Portable flow meter IST-1). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2005, pp. 35–40.

2. *Grekov N.A., Grekov A.N., Danilenko M.Ya., and Zhemkov E.I.* Issledovaniye akusticheskogo kanala izmeritelya skorosti techeniya (Investigation of the Acoustic Channel of the Current Velocity Meter). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2007, pp. 28–31.

3. *Alekseev S.Yu. and Grekov A.N.* Akusticheskiy izmeritel' skorosti i napravleniya techeniya IST-1M rechnogo i morskogo naznacheniya (Acoustic current velocity and direction meter IST-1M for river and sea purposes). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2008, pp. 77–82.

4. *Grekov A.N. and Grekov N.A.* Izmeriteli skorosti techeniy dlya morskikh i rechnykh usloviy IST-1 i IST-1M (Current velocity meters for sea and river conditions IST-1 and IST-1M). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2010, No. 2, pp. 77–84.

5. *Mandard E., Kouame D., Battault R., Remenieras J.P., and Patat F.* Transit time ultrasonic flowmeter: Velocity profile estimation. *Ultrasonics*, 2005, Vol. 2, pp. 763–766.

6. *Willatzen M. and Kamath H.* Nonlinearities in ultrasonic flow measurement. *Flow Meas. Instrum*., 2008, Vol. 19, pp. 79–84.

7. *Rajita G., and Mandal N.* Review on transit time ultrasonic flowmeter. *In Proceedings of the International Conference on Control*, Kolkata, India, 28–30 January 2016.

8. *Lynnworth L.C. and Liu Y.* Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005. *Ultrasonics*, 2006, Vol. 44, pp. E1371–E1378.

9. *Iooss B., Lhuillier C., and Jeanneau H.* Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters: Uncertainties due to flow profile and fluid turbulence. *Ultrasonics*, 2002, Vol. 40(9), pp. 1009–1015. DOI: 10.1016/s0041-624x(02)00387-6

10. *Hui Zhang, Chuwen Guo, and Jie Lin*. Effects of Velocity Profiles on Measuring Accuracy of Transit-Time Ultrasonic Flowmeter. *Appl. Sci*. 2019, Vol. 9, pp. 1648. DOI:10.3390/app9081648

11. *Liu Z.G., Du G.S., Shao Z.F., He Q.R., and Zhou C.L.* Measurement of transitional flow in pipes using ultrasonic flowmeters. *Fluid Dyn. Res*., 2014, Vol. 46(5), pp. 055501.

12. www.autodesk.ru/autocad

13. www.solidworks.ru

14. *Del Grosso V.A. and Mader C.W.* Speed of sound in pure water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1972, Vol. 52, pp. 1442. https://doi.org/10.1121/1.1913258