УДК 681.2.08:004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ

А.Н. Греков, Ю.Е. Шишкин

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: oceanmh@ya.ru
E-mail: yourockpro@gmail.com

Выполнен обзор конструкций и методов, используемых трехкомпонентных акустических измерителях скорости и направления течения различных фирм. Предложена новая конструкция трехкомпонентного четырехбазового времяпролетного акустического измерителя скорости и направления течения, сделаны оценки погрешностей, вызванные температурными расширениями конструктивных элементов корпуса и искажениями водного потока, вносимыми самим измерителем. Выполнены испытания на имитационной модели для определения обтекаемости прибора.
Ключевые слова: измерение скорости течения, измерение скорости звука, эффект Доплера, времяпролетный метод, высокоточные измерения, моделирование сложных систем.

Введение. В настоящее время активно совершенствуется и применяется на практике широкий класс устройств измерения скорости и направления течения. Среди существующих методов и средств контроля гидрологических параметров только часть может быть использована эффективно на средних и больших глубинах из-за влияния высокого давления, агрессивности морской среды и необходимости привязки измеряемых параметров к пространственным координатам. Хорошо себя зарекомендовал класс устройств, использующий акустический доплеровский и времяпролетный принципы измерения [1].

Постановка задачи. Разработать методы измерения трех компонент вектора скорости течения, скорости звука в воде и устройство для их реализации. Используя имитационное моделирование провести оценку случайных и систематических погрешностей, построить диаграмму направленности зонда.

Материалы и методы. На сегодняшний день производители приборов представили четыре принципиально различающихся конструкции трехкомпонентных акустических измерителей скорости и направления течения: доплеровские профилографы дальнего действия (рис. 1, *а*), доплеровские трехкомпонентные измерители скорости и направления течения ближнего действия, доплеровские точечные измерители скорости и направления течения, времяпролетные трехкомпонентные акустические измерители скорости и направления течения [2].

а) б) в) г)

Рис. 1. Конструкции трехкомпонентных измерителей скорости и направления течения: *а*) доплеровский дальнего действия Nortec AWAC; *б*) доплеровский ближнего действия Aquadopp; *в*) доплеровский точечный SonTec Argonaut; *г*) времяпролетный Falmouth Scientific 3D-ACM

Доплеровские профилографы дальнего действия, представлены на рынке устройствами серий ADP, AWAC и Argonaut-XR компаний SonTek, Nortek AS (патент № US8223588) и YSI (патент № US8125849B2) соответственно [3].

Данный класс приборов предназначен для исследования 3D профилей потоков с толщиной разрешаемого по глубине слоя порядка 8 м, что определяет его область эффективного применения как отличающуюся, от трех других рассматриваемых классов, производящих измерения точечно или в ограниченном объеме непосредственно вблизи измерительной головки. Вследствие чего, в данной статье, профилографы дальнего действия не будут рассмотрены в качестве альтернативы разрабатываемому измерителю скорости течения.

Типовое использование представленных ниже классов измерителей предусматривает проведение зондирования с борта судна или буйковых носителей. Доплеровские трехкомпонентные измерители скорости и направления течения ближнего действия представлены устройствами серий ACM и Aquadopp HR (рис. 1, *б*) компании Nortek AS. Данный класс устройств обладает меньшей мощностью и большей частотой излучения, что на порядок уменьшает толщину разрешаемого по глубине слоя при одновременном увеличении разрешающей способности самого прибора, типовые характеристики для данного класса устройств следующие [4]:

– диапазон измерения скорости до 5 м/с;

– погрешность измерения ±1%, ±0,5 см/с;

– погрешность измерения направления течения, при наклоне до 20° составляет ±2°.

Точечные доплеровские измерители скорости и направления течения, представленные устройствами серий Argonaut (рис. 1, *в*) и RiverSurveyor, компаний SonTek и YSI (патент № US6714482B2) обладают, по сравнению с предыдущим классом, большим диапазоном измерений, достигающих 7 м/с с погрешностью измерения ±0,5%, ±0,1 см/с. Более высокие технические характеристики достигнуты за счет проведения измерений в одной точке, а не в объеме как при использовании доплеровских профилографов ADP, AWAC и Argonaut-XR [5].

Времяпролетные трехкомпонентные акустические измерители скорости и направления течения ближнего действия серии 3D-ACM (рис. 1, *г*) и MAVS-3 компаний Falmouth Scientific и General Oceanics соответственно имеют принципиально другой способ измерения и используют более простую элементную базу. Технические характеристики этих приборов аналогичны точечным доплеровским измерителям [6]:

– диапазон измерения скорости до 6 м/с;

– погрешность измерения ±0,5%, ±0,1 см/с;

– погрешность измерения направления течения, при наклоне до 20° составляет ±2°.

На основе проведенного анализа, предлагается усовершенствованный метод измерений, реализованный в конструкции времяпролетного измерителя, в котором акустические трансмиттеры расположены на трех взаимно ортогональных осях. Закладываемые на этапе проектирования прибора технические характеристики, аналогичны заявленным в документации времяпролетного измерителя 3D-ACM, как обладающего наилучшими характеристиками среди устройств данного класса. Использование предложенного трехкомпонентного четырехбазового времяпролетного акустического измерителя скорости и направления течения (рис. 2) позволит производить измерения с минимальным искажением водного потока, в этом случае достигается минимально возможные погрешности измерения при существующей элементной базе. В отличие от 3D-ACM, в котором для расчета скорости звука используется дополнительный CTD модуль, предложенная конструкция позволяет производить измерения скорости звука напрямую.

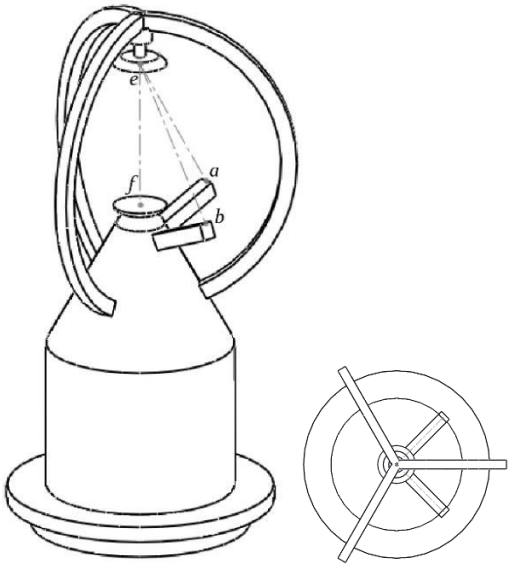


Рис. 2. Конструкция четырехбазового времяпролетного трехкомпонентного измерителя скорости и направления течения

Рассмотрим алгоритм работы. Время прохождения сигнала вдоль трансмиттеров *e* и *f* в зависимости от направления акустического импульса описывается соотношениями:

$$t_{fe} = \frac{h}{c + v_z}, \qquad (1)$$

$$t_{ef} = \frac{h}{c - v_z}, \qquad (2)$$

где h – расстояние между трансмиттерами *e* и *f*; c – скорость звука в воде; v_z – скорость течения вдоль оси Z

$$h = L \cdot \sin\alpha. \qquad (3)$$

Подставив (3) в (1) и (2) и получим:

$$t_{fe} = \frac{L \cdot \sin\alpha}{c + v_z}, \qquad (4)$$

$$t_{ef} = \frac{L \cdot \sin\alpha}{c - v_z}. \qquad (5)$$

Выразим скорость распространения звука в среде из (4) и (5), затем приравняем обе части

$$\frac{L \cdot \sin\alpha}{t_{fe}} - v_z = \frac{L \cdot \sin\alpha}{t_{ef}} + v_z. \qquad (6)$$

Найдем вертикальную компоненту скорости вектора течения

$$v_z = \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{fe}} - \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{ef}}. \qquad (7)$$

Определим скорость распространения звука в среде из (4), подставив вместо компоненты v_z ее выражение из (7) в виде

$$c = \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{ef}} + \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{fe}}. \qquad (8)$$

Время прохождения акустических сигналов по акустическим каналам *ae* и *be*, проекции которых на горизонтальную плоскость ортогональны, могут быть описаны формулами (9) и (10) соответственно:

$$t_{ae} = \frac{L}{c + v_x \cdot \cos\alpha + v_z \cdot \sin\alpha}, \qquad (9)$$

$$t_{be} = \frac{L}{c + v_y \cdot \cos\alpha + v_z \cdot \sin\alpha}, \qquad (10)$$

Выразим скорость распространения звука в воде из (4) и (9) и приравняем их, подставив в качестве вертикальной компоненты скорости вектора течения ее значение в соотношении (7) в виде:

$$\frac{L}{t_{ae}} - \sin\alpha \cdot \left(\frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{fe}} - \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{ef}} \right) - \cos\alpha \cdot v_x = \frac{L \cdot \sin\alpha}{t_{ef}} - \left(\frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{fe}} - \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{ef}} \right). \qquad (11)$$

Определим горизонтальную компоненту скорости течения v_x

$$v_x = \frac{\sin\alpha \cdot \left(\frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{fe}} - \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{ef}} \right) + \frac{L}{t_{ae}} - \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{ef}} - \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{fe}}}{\cos\alpha}. \qquad (12)$$

Аналогично определим скорости распространения звука в среде из (5) и (10) и приравняем их, подставив в качестве вертикальной компоненты скорости вектора течения ее значение в соотношении (7) и найдем горизонтальную компоненту скорости течения v_y

$$v_y = \frac{\sin\alpha \cdot \left(\frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{ef}} - \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{fe}} \right) + \frac{L}{t_{be}} - \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{ef}} - \frac{L \cdot \sin\alpha}{2 \cdot t_{fe}}}{\cos\alpha}. \quad (13)$$

Направление вектора течения по часовой стрелке относительно северного направления магнитного меридиана может быть представлено в виде

$$Dir(v_x, v_y) = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{v_x}{\sqrt{v_x^{\,2} + v_y^{\,2}}} \right), v_y \geq 0 \\ \pi - \arcsin\left(\frac{v_x}{\sqrt{v_x^{\,2} + v_y^{\,2}}} \right), v_y < 0 \end{cases}. \quad (14)$$

Адекватность построенной модели представленного метода измерений была проверена с использованием математического пакета Mathcad 15.

Вследствие того, что разрабатываемое устройство планируется эксплуатировать на глубинах 2000 м и более, материал корпуса что позволит так как при меньшей толщине стенок корпуса обеспечить большие прочностные характеристики, меньший вес и упрощение эксплуатации. Для корпуса рассматриваемого устройства рекомендовано использовать титановый сплав марки ПТ–3В, ГОСТ: 19807–91, коэффициент линейного теплового расширения, принятый для дальнейших расчетов, составляет $9 \cdot 10^{-6}$ м/град.

Выразим отклонение измеряемых векторных компонент v_x (15), v_y (16) и c (17) через удельное приращение длины конструктивных элементов при условии равномерного нагрева корпуса устройства.

$$\Delta v_x = \frac{\delta v_x}{\delta t} \cdot \Delta t, \quad (15)$$

$$\Delta v_y = \frac{\delta v_y}{\delta t} \cdot \Delta t, \quad (16)$$

$$c = \frac{\delta c}{\delta t} \cdot \Delta t. \quad (17)$$

Максимальная систематическая погрешность, вызванная температурными расширениями, при эксплуатации в рамках заявленных рабочих температур, описывается соотношением

$$\delta_i = \frac{v_i\left(L_{t_{\max}}\right) - v_i\left(L_{t_{\min}}\right)}{v_i\left(L_{t_{\max}}\right)}, \quad (18)$$

где $L_{t_{\max}}$ – линейный размер титанового элемента конструкции, определяющий длину наклонного акустического канала при заданной температуре, i – индекс компоненты скорости течения x, y.

Максимальная систематическая погрешность измерения v_x и v_y, вызванная температурными расширениями конструктивных элементов, составит $\delta_{x,y} = 2{,}7 \cdot 10^{-7} \approx 0{,}03\%$, данная погрешность пренебрежимо мала по сравнению с заданным допуском погрешностей.

В реальных термодинамических системах невозможно гарантировать равномерность нагрева всех конструктивных элементов, поэтому при наихудшем сценарии функция относительных по-

грешностей будет представлять собой систему, включающую погрешности вдоль осей X и Y, значения которой можно представить в виде поверхности относительных погрешностей (рис. 3), и множестве локальных экстремумов в точках, удовлетворяющих соотношению

$$x = y, \begin{cases} |x| \geq 1 \\ |y| \geq 1 \end{cases}. \qquad (19)$$

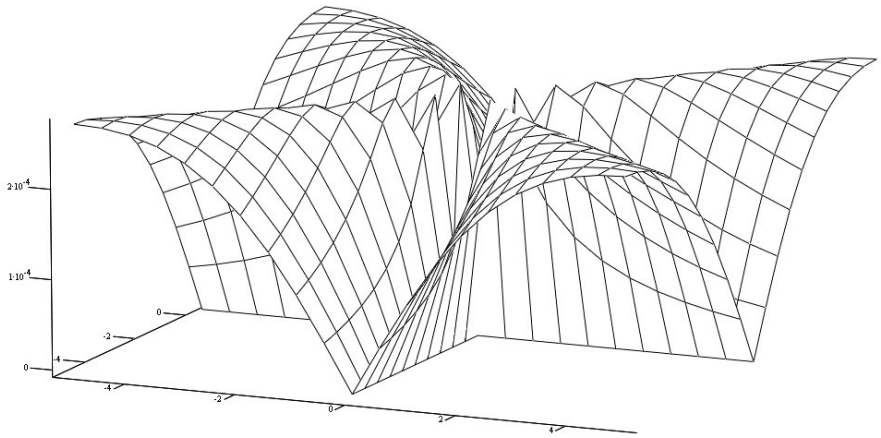


Рис. 3. Поверхность относительных погрешностей измерений скорости течения, по оси абсцисс отложена компонента вектора v_x, по оси ординат отложена компонента вектора v_y, по оси аппликат отложены относительные погрешности измерений скорости течения

Как следует из рис. 3, погрешности, вызванные температурными воздействиями, составляют не более чем 0,2% что полностью укладывается в 0,5% интервал погрешности, заложенной в измерительный прибор. В случае неравномерности температурного расширения корпуса прибора погрешность описывается нелинейной функцией, множество экстремумов которой не превышает 0,2%, что в полной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к устройству.

Исследования, проведенные на имитационной модели, показали эффективность использования сферы, защищающей акустические трансмиттеры, представленного вида, что подтверждается крайне незначительными искажениями, потока жидкости вдоль трех акустических каналов.

Разработка и анализ геометрической формы зонда проводилось с использованием численной гидродинамической модели, как одного из наиболее эффективных способов проведения испытаний в сложных физических системах [7]. Расчет обтекающего потока производился с использованием CAD/CAE программного пакета FloWorks системы проектирования SolidWorks. Расчетная область $1{,}5 \times 1{,}5 \times 1{,}5$ м. Вычислительная сетка порядка 368 тыс. конечных объемов. Векторное поле обтекания зонда представлено на рис. 4. Значения горизонтальной и вертикальной составляющей вектора скорости течения, проходящего через акустические пути устройства, определяющие его чувствительность, представлены на рис. 5 и рис. 6 соответственно.

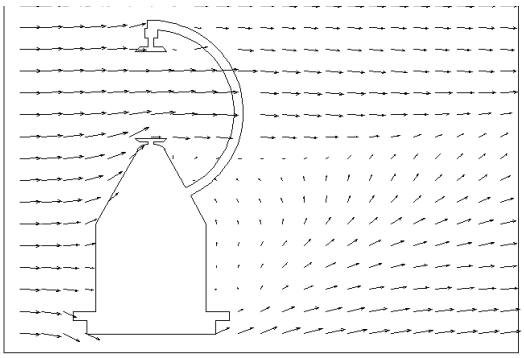


Рис. 4. Векторное поле обтекания зонда

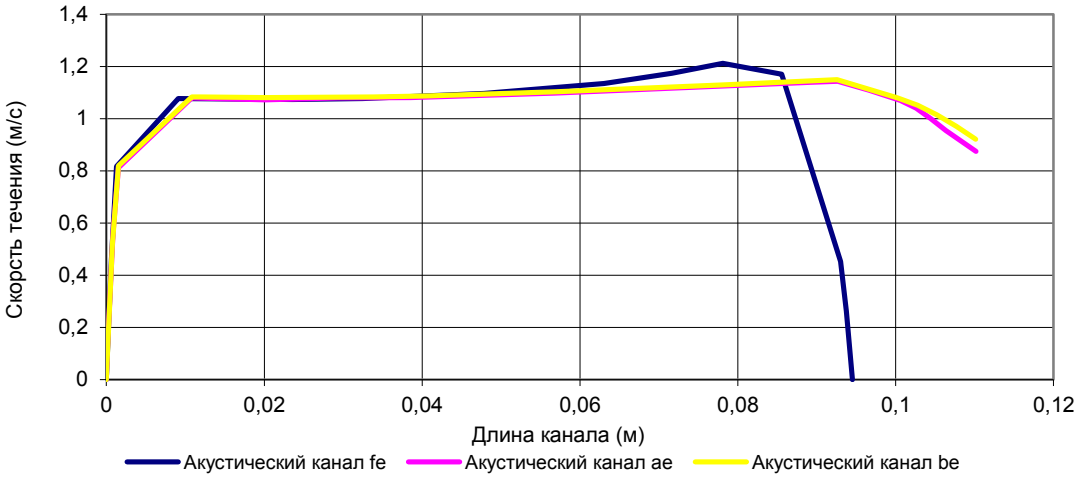


Рис. 5. График горизонтальной составляющей вектора скорости течения, проходящего через акустические каналы *fe*, *ae* и *be*

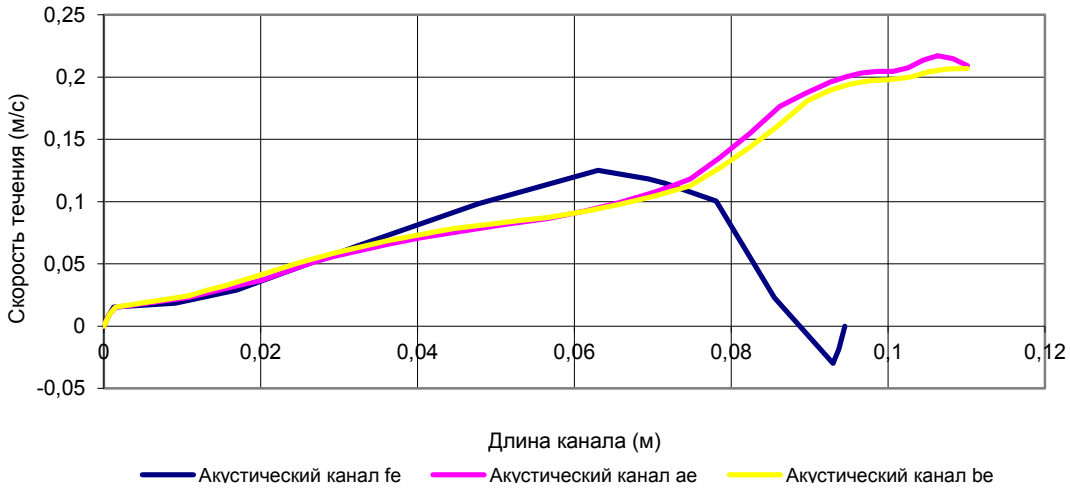
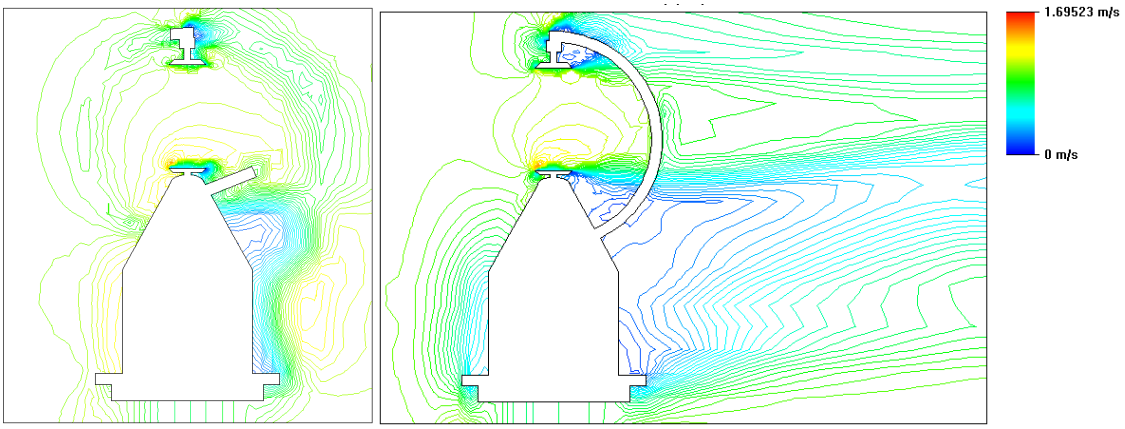


Рис. 6. График вертикальной составляющей вектора скорости течения, проходящего через акустические каналы *fe*, *ae* и *be*

Конструкция прибора рассчитана таким образом, чтобы обеспечить минимальные искажения водного потока в области прохождения звуковых каналов (рис. 7).

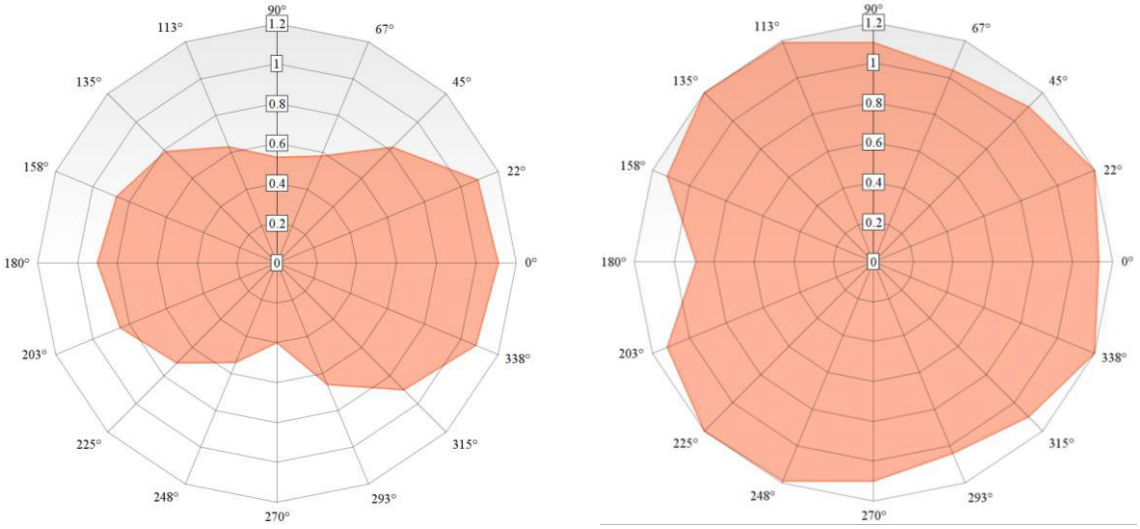


а) б)

Рис. 7. Карта изолиний изменения скорости течения в ламинарном потоке вызванного присутствием измерительного зонда: *а*) фронтальная проекция; *б*) боковая проекция

Начальные условия моделирования: модуль скорости течения составляет 1 м/с, направление течения неизменно в рамках итерации, поток ламинарный, давление соответствует водному столбу высотой в 50 м, температура, характерная для данной глубины в Черном море в летний период, составляет 8,5°С.

Произведем серию экспериментов с одинаковыми начальными условиями варьируя, с заданным шагом, направление течения вдоль осей x, y, z. Проинтегрируем значения модуля вектора скорости течения, проходящего вдоль акустических каналов, и сравним их с заданными как начальные условия. Частное этих значений имеет физический смысл чувствительности головки прибора, которая в графическом виде может быть представлена в виде диаграммы направленности (рис. 8).



а) б)

Рис. 8. Диаграмма направленности головки измерительного зонда: *а*) фронтальная диаграмма направленности; *б*) вертикальная диаграмма направленности

Проведение имитационных экспериментов, для построения диаграммы направленности прибора, происходит по следующей методике: в среде моделирования задается начальная скорость течения 1 м/с во всем моделируемом пространстве; направление течения α изменяется дискретно с шагом 22,5° вдоль одной плоскости; итерация эксперимента продолжается до тех пор, пока модель системы не перейдет в стационарное состояние; центры акустических трансмиттеров соединяют отрезками на каждом из которых отмечается по 10 точек, в каждой точке производится замер модуля скорости течения; производится усреднение модуля скорости течения l по всем точечным замерам в рамках каждой итерации; на расстоянии l из центра лепестковой диаграммы под углом α откладывается точка; аналогичные шаги повторяются для каждой итерации до тех пор, пока система не перейдет в исходное состояние; отмеченные на диаграмме точки имеют физический смысл фактически регистрируемых устройством скоростей течения, протекающих под углом α относительно горизонтальной плоскости зонда, при фактической скорости течения 1 м/с, или коэффициента чувствительности устройства в заданном направлении.

Согласно данным диаграммы направленности максимальная чувствительность достигается при прохождении течения в горизонтальной плоскости устройства, минимальная чувствительность при восходящем течении.

Заключение. Проведенное сравнение активно применяемых на практике устройств для мониторинга скорости и направления течения показало близкие показатели по техническим характеристикам. Большей точностью, по сравнению с доплеровскими профилографами

дальнего и ближнего действия, обладают точечные доплеровские и времяпролетные измерители. В предложенном авторами способе измерения трех компонент скорости течения и конструкция зонда использует четыре акустических трансмиттера, по сравнению с восьмью, используемыми в приборе 3D-ACM. Построена диаграмма направленности измерительной головки зонда что позволяет компенсировать систематические погрешности, вызванные искажением водного потока. Чувствительность прибора в рабочих направлениях измерений находится в пределах 0,7 – 1,2, что подтверждено исследованиями на имитационной модели. В отличие от 3D-ACM, в котором для измерения скорости звука используется дополнительный TDC модуль, в предлагаемом приборе скорость звука измеряется напрямую, из-за особого расположения излучателей. Результирующая систематическая относительная погрешность измерения скорости течения, учитывающая температурные расширения корпуса устройства составила 0,03%. Искажения, вносимые корпусом устройства в водный поток, не превышают 0,23%, систематические погрешности могут быть преодолены посредством проведения калибровки и определения фактической диаграммы направленности.

В настоящее время сконструирован и изготовлен макет прибора, который проходит испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. *Шишкин Ю.Е., Греков Н.А.* Исследование систем управления высокоточными измерениями // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2015: материалы междунар. науч.-техн. конфер. молодых ученых, аспирантов и студентов / под науч. ред. А.Т. Барабанова. Севастополь: СевГУ, 2015. С. 221–225.

3. *Initial* Flow Characterisation Utilising Turbine and Seabed Installed Acoustic Sensor Arrays / Duncan Sutherland [et al.] // Report new instrumentation and field measuring technology for tidal currents, 2015. P. 66–69.

4. *Заякоренная* профилирующая океанская обсерватория / А.Г. Островский [и др.] // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2. С. 50–59.

5. *Near* bottom velocity and turbidity measurements in coastal waters of NW Estonia / A. Erm [et al.] EU Baltic International Symposium, Baltic 2010. Riga, 2010.

6. *Le Menn Marc*. Instrumentation and metrology in oceanography. London ISTE Ltd P. 129–138. ISBN 978-1-84821-379-1

7. *Шишкин Ю.Е.* Анализ моделей взаимодействия пользователей и провайдеров облачных сервисов // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2016: материалы всерос. науч.-техн. конфер. молодых ученых, аспирантов и студентов. Севастополь 19–21 мая 2016 г. Севастополь: СевГУ, 2016. С. 289–293.

THREE-AXIS ACOUSTIC CURRENT METER MODELING

A.N. Grekov, Y.E. Shishkin

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

The paper introduces overview of the structures and approaches of three-component acoustic meters of flow speed and direction available on market. It was proposed new design of the three-way four-base time of flight speed and direction acoustic measuring instrument, produced calculations of errors caused by probe constructive elements thermal expansion and flow distortions caused by the water flow meter insertion, and produced the results of tests on the simulation model to determine the device hydrodynamics.

Keywords: flow rate measurement, speed of sound measuring, Doppler effect, time of flight method, high-precision measurement, complex systems simulation.