

Измерение расхода воды в реках с ледяным покровом методом горизонтального гидроакустического зондирования

Р. А. Балакин, В. Э. Голавский

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: rigms@aari.ru

Экспериментально исследован метод горизонтального гидроакустического зондирования для измерения расхода воды в реках с ледяным покровом. Подтверждена работоспособность метода. Изучены два варианта метода: импульсное зондирование широкополосными сигналами с линейно-частотной модуляцией и разностно-фазовое зондирование узкополосными синусоидальными сигналами. Определены характеристики зондирующих сигналов и порядок значений погрешностей измерений.

Ключевые слова: гидроакустика, расход воды в реках, погрешность измерения, акустическое зондирование, многолучевость, ледяной покров.

Знание расхода воды в реках и каналах необходимо во все сезоны года для решения задач водоснабжения, гидроэнергетики, экологии, речного транспорта, прогнозирования опасных природных явлений в виде паводков, наводнений, ледяных заторов. Расход воды – объём воды (в кубических метрах), проходящей через поперечное сечение реки за 1 с. Традиционная методика измерения расхода воды в реках методом «скорость–площадь» предполагает определение глубины реки на промерных вертикалях в фиксированных точках измерительного створа и измерение скорости течения на нескольких глубинах для каждой вертикали [1]. По результатам измерений скорости течения вычисляют среднюю по глубине скорость на вертикалях. Общий расход воды вычисляют как сумму частных расходов, ограниченных промерными вертикалями от берега до берега. Погрешность измерения расхода воды таким методом складывается из погрешностей измерения площади живого сечения реки и средней скорости течения и составляет 6–12 % [2].

При неподвижном ледяном покрове измерения производят через пробуренные лунки во льду, что многократно увеличивает трудоёмкость и при большой ширине реки становится практически невыполнимым. В периоды ледостава и ледохода, при половодьях и наводнениях метод применять нельзя. Отсутствие возможности измерения расхода воды в реках в критически важные периоды является существенным недостатком традиционного метода наряду с большими затратами ручного труда и низкой производительностью.

В настоящее время получает распространение новый метод измерения расхода воды, основанный на акустическом доплеровском методе вертикального зондирования толщи воды с борта плавсредства, движущегося поперек реки [3]. Вертикальный профиль скорости течения реки оценивают с помощью доплеровского четырёхлучевого эхолота. Глубина реки в точке промера измеряется по отражениям от дна звуковой волны. На промежуточных глубинах отражения звука вызываются микроскопическими рассеивателями, рас-

пределёнными по всей толще воды. Амплитуда отражённых гидроакустических сигналов по отношению к естественным акустическим шумам является весьма малой, особенно в чистой воде, образующейся при таянии снега и льда. При малой плотности рассеянных в воде отражателей результаты измерений скорости течения становятся ненадёжными и содержат большие (более 15 %) погрешности [4–6].

Для измерения расхода воды в северных реках с ледяным покровом оптимальным представляется метод горизонтального гидроакустического зондирования [7, 8]. Цель настоящей работы – обоснование применимости метода горизонтального гидроакустического зондирования для измерения расхода воды в реках и каналах в условиях влияния ледяного покрова, повышенного уровня гидроакустических шумов в штормовую погоду, неблагоприятного рельефа русла реки, большой ширины реки (до 10 км и более). Применимость метода оценивается положительно, если трудозатраты и погрешности измерений не превышают показателей традиционного метода.

Метод горизонтального гидроакустического зондирования. При горизонтальном зондировании реки (от берега до берега) используются два встречных гидроакустических луча, излучаемых и принимаемых двумя приёмопередающими гидрофонами. Лучи проходят под косым углом к направлению течения, так что составляющая скорости одного луча совпадает с направлением течения, а другого – направлена против течения. Схема горизонтального гидроакустического зондирования представлена на рис. 1. Скорость течения в реке измеряется по разности временных задержек прямого и обратного лучей. Преимущество метода гидроакустического зондирования, основанного на приёме прямого, а не отражённого сигнала, заключается в большей дистанционности и повышенной помехоустойчивости к акустическим шумам. При использовании метода горизонтального зондирования для определения расхода в реке необходимо знать площадь сечения потока и среднюю по сечению скорость с учётом эпюры распределения скоростей по глубине и ширине реки.

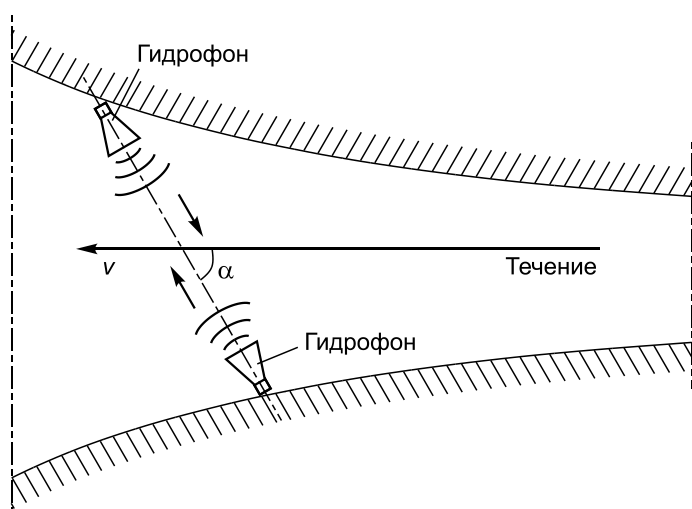


Рис. 1. Схема горизонтального гидроакустического зондирования

Аналогичный метод измерения применяется в ультразвуковых расходомерах, предназначенных для измерения расхода жидкостей или газов в трубопроводах различного назначения [9] и обеспечивающих погрешность измерения на уровне 1–2 %.

Импульсный метод зондирования. При использовании этого метода зондирования от берега до берега связь между скоростью течения и разностью временных задержек встречных лучей определяется следующим образом:

$$T_1 = L / (c + v \cos \alpha);$$

$$T_2 = L / (c - v \cos \alpha);$$

$$T_2 - T_1 = 2Lv / (c^2 - v^2 \cos^2 \alpha),$$

где T_1 , T_2 – время хода лучей соответственно в прямом и обратном направлениях; L – дистанция зондирования; v – скорость течения; c – скорость звука в воде; α – угол отклонения луча от направления течения.

Фазовый метод зондирования. Измеряется разность фаз двух встречно направленных акустических лучей. Связь между разностью фаз и скоростью потока жидкости выражается как

$$\varphi = 4\pi f L v \cos \alpha / (c^2 - v^2 \cos^2 \alpha), \quad (1)$$

где φ – разность фаз прямого и обратного лучей; f – частота несущего сигнала.

Измерение временных задержек акустических сигналов или фазовых сдвигов прямого и обратного лучей выполняется относительно общей шкалы времени, для этого требуется обязательная синхронизация излучателя с приёмником по времени или фазе. При реализации метода горизонтального акустического зондирования необходимо обеспечить возможность измерений при достаточно большой ширине реки и свести к минимуму мешающие факторы – многолучевость распространения звука в мелководных акваториях, акустиче-

ские шумы, обусловленные дрейфующими льдами и поверхностным волнением реки.

Реальность решения такой задачи подтверждается успешной работой акустической связи на больших дистанциях в сходных гидрологических и погодных условиях. Например, в мелководных арктических морях успешно эксплуатируется система акустической связи фирмы LinkQuest Inc., США на дальности до 10 км при мощности излучения передатчика $W=12$ Вт. По сравнению с каналом цифровой акустической связи канал гидроакустического зондирования содержит многократно меньший объём информации, поскольку скорость течения является медленноменяющейся величиной.

Оптимальным для измерения временных задержек является широкополосный импульсный сигнал с линейной частотной внутриимпульсной модуляцией (ЛЧМ) [10]. Для обработки широкополосного сигнала на стороне приёма вычисляется корреляционный максимум между принятым сигналом и его эталонной копией, хранящейся в памяти приёмника. Корреляционный метод обработки может применяться для подавления многолучевости путём разделения лучей по временному сдвигу и выбора доминантного луча максимальной амплитуды.

При фазовом методе зондирования два синусоидальных узкополосных сигнала одновременно излучаются с противоположных берегов навстречу друг другу. Длительность сигналов должна быть не меньше времени распространения лучей от излучателя до приёмника. Фаза каждого из принятых сигналов измеряется относительно частоты местных опорных генераторов, синхронизованных по сигналам точного времени. Результаты измерения фазы в цифровом виде передаются в пункт приёма и обработки данных, где вычисляется расход воды речного стока. Преимуществом фазового метода (по сравнению с импульсным зондированием) является более значительная дистанционность и высокая помехоустойчивость к акустическим шумам благодаря узкополосности и более высокому коэффициенту полезного действия (КПД) приёмноизлучающих гидрофонов, работающих на фиксированной частоте в резонансном режиме.

Физическая модель распространения гидроакустического сигнала в русле реки. Для оптимизации характеристик акустической системы расхода воды необходимо учитывать параметры среды распространения звука: ширину и глубину реки; коэффициенты отражения и рассеяния звука от дна и поверхности; нестационарность характеристик гидроакустического канала.

Для расчёта акустического давления в точке приёма при известных параметрах гидроакустического канала используется волновая модель гидроакустического поля [10, 11]. В мелководных водоёмах звук распространяется так же, как в волноводе: в виде ограниченного набора нормальных волн (мод) с многократными переотражениями от дна и поверхности. В горизонтальной плоскости звук распространяется в виде расходящихся цилиндрических волн в ограниченном секторе, угловая ширина которого обусловлена диаграммой направленности излучающего гидрофона. В вертикальной плоскости фиксированные углы скольжения исходящих лучей для каждой моды определяются волновым уравнением. Рус-

ло реки соответствует условиям волноводного распространения, поэтому для расчёта акустического поля используют волновое уравнение [10]:

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla F, \quad (2)$$

где Δp – искомая функция звукового давления; ∇F – функция источника звука.

Решение дифференциального уравнения (2) имеет вид суммы нормальных волн. Каждую нормальную волну можно представить как пару плоских волн, падающих на границы волновода под некоторым углом γ и распространяющихся по зигзагообразной траектории вследствие последовательных переотражений от дна и поверхности. В вертикальной плоскости нормальные волны образуют стоячую волну с пучностями и узлами, зафиксированными на определённых глубинах. В горизонтальном направлении распространяются синусоидальные бегущие волны, каждая со своей скоростью, несколько меньшей скорости звука. Связь между номером n нормальной волны (моды) и углом γ скольжения падающей плоской волны описывается волновым уравнением

$$\sin \gamma = (n - 1/2) \lambda / a,$$

где $\lambda = c/f$ – длина волны; a – параметр затухания.

Нормальные волны с крутыми углами падения на границы среды (имеющие больший номер n) испытывают многократные переотражения и быстро затухают. В реальности до приёмника доходят не более четырёх нормальных волн затухающей амплитуды. На рис. 2 показано типичное распределение звукового давления стоячих нормальных волн по глубине волновода, где H – глубина моря; p – звуковое давление, причём для каждой моды $n=0, \dots, 3$ знак p меняется (с минуса на плюс) при переходе через штирхпунктирную линию.

Более наглядной для анализа звукового поля является лучевая модель, где каждой моде соответствует исходящий луч, переотражённый от дна и поверхности определённое число раз. При расчёте амплитуды звукового давления луча, проходящего в точку приёма, учитывается затухание β звука при распространении, зависящее от частоты и расстояния [12]:

$$\beta = 0,036 f^{3/2}. \quad (3)$$

Временные задержки акустических лучей подвержены флуктуациям под влиянием турбулентности водного потока, локальных неоднородностей температуры, поверхностного волнения, дрейфа ледяного покрова. Количественные оценки амплитуды и спектральных характеристик флуктуации, а также степень коррелированности флуктуаций прямого и обратного лучей требуют экспериментальных исследований в натуральных условиях.

Методика натурных исследований метода горизонтального гидроакустического зондирования. Задача натурных испытаний заключалась в проверке расчётных значений характеристик (затухания сигнала, уровня акустических шумов

и потенциальных погрешностей измерения скорости течения) метода горизонтального гидроакустического зондирования речного стока и их соответствие реальным значениям.

Натурные исследования метода проводили в Санкт-Петербурге в устье Малой Невки в условиях сплошного ледяного покрова. К влияющим негативным факторам относились многолучевость распространения звука, нестационарность гидроакустического канала, а также повышенное затухание сигнала при многократных переотражениях от дна и ледяного покрова. Ширина реки в районе работ составляла 800 м, средняя глубина – около 3 м, скорость течения в судоходном фарватере шириной 120 м – примерно 80 см/с. Толщина ровного ледяного покрова у берега составляла 30 см, в середине реки – около 15 см. Уровень воды контролировали в лунке у берега с помощью рейки, в течение одного эксперимента уровень оставался неизменным.

При исследованиях использовали экспериментальный образец телекоммуникационной системы, состоящий из двух приёмопередающих пьезокерамических гидрофонов и полосовых усилителей излучаемых и принимаемых сигналов. Ширина диаграммы направленности гидрофонов составляла 30° в вертикальной плоскости и 10° в горизонтальной. Гидрофоны устанавливали вблизи берегов на глубине 1,5 м навстречу друг другу под углом 45° к направлению течения.

Исследования проводили в два этапа. На первом этапе проверяли импульсный метод зондирования реки, при котором измеряли временные задержки распространения акустических лучей от берега до берега в прямом и обратном направлениях. Оценивали флуктуации временных задержек доминантного луча с максимальной амплитудой сигнала и запаздывающих лучей с многократными переотражениями от дна и ледяного покрова. Зондирование осуществляли широкополосными импульсными ЛЧМ-сигналами на несущей частоте 24 кГц, оптимальной для дистанции 1000 м по критерию максимального отношения полезного сигнала к акустическим шумам (отношению S/N). Импульсные сигналы на стороне приёма обрабатывались корреляционным методом путём сравнения с эталонной копией, хранящейся в памяти приёмника. Затухание акустических лучей определяли по амплитуде принятых сигналов при заданной мощности излучения.

На втором этапе исследований проверяли фазовый метод зондирования. В этом эксперименте с каждого берега навстречу друг другу одновременно излучались два синусоидальных сигнала длительностью τ , равной времени распро-

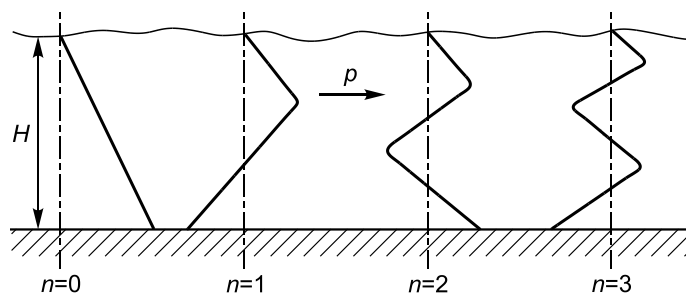


Рис. 2. Изменение звукового давления p с глубиной H для первых четырёх мод n

странения луча от излучателя до приёмника. Чтобы избежать многозначности отсчёта фазы, измерения фазы проводили не на несущей частоте, а на относительно низкой (200 Гц) частоте амплитудной модуляции, наложенной на несущую частоту. Низкую частоту модуляции рассчитывали по формуле (1) для дистанции 1000 м и фазового сдвига 360° при скорости течения 2 м/с. При измерениях оценивали флуктуации фазы сигналов в интервале осреднения 10 мин. Исследовали также зависимость флуктуаций фазы от излучаемой мощности и уровня акустических шумов.

При формировании излучаемых сигналов и обработке принятых сигналов использовали звуковые карты портативных персональных компьютеров с соответствующим программным обеспечением. Для повышения точности результатов измерений временных задержек акустических лучей и фазовых сдвигов компьютеры синхронизировались по сигналам точного времени спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS с погрешностью 10 мкс с частотой повторения 1 Гц.

Случайная и систематическая составляющие погрешности измерения скорости течения оценивали косвенным методом, поскольку прямых измерений течения традиционными методами не проводили. Случайную составляющую погрешности измерения средней скорости течения за интервал осреднения 10 мин определяли по разбросу временных задержек и разности фаз единичных отсчетов. Систематическую составляющую погрешности измерения оценивали по соответствию результатов импульсного и фазового методов зондирования, а также по повторяемости результатов измерения между сеансами измерения с интервалами в несколько часов.

Результаты натурных исследований метода горизонтального гидроакустического зондирования. В ходе испытаний обнаружили, что зондирующие импульсные сигналы сильно искажаются по форме после прохождения через излучающий и приёмный гидрофоны. Причина искажений заключается в несогласованности фазочастотных и амплитудных характеристик указанных гидрофонов со спектром зондирующего сигнала. В результате искажения формы принимаемых сигналов по отношению к эталону, хранящемуся в памяти приёмника, резко уменьшалась амплитуда корреляционного максимума, а форма максимума становилась многопиковой, что приводило к многозначности отсчёта временной задержки сигнала. В итоге терялась способность разделения приходящих лучей многолучевого сигнала по временным задержкам и амплитудам.

Для восстановления формы искажённых в канале связи сигналов обычно применяется эквалайзер (программа микропроцессора), выполняющий функцию согласованного фильтра. В данном эксперименте использовали более простой способ, заключающийся в предискажении опорного сигнала корреляционной обработки. Роль опорного сигнала взамен исходного эталона играл сигнал, принятый при тестировании системы в опытовом ледовом бассейне ААНИИ. Торцы этого бассейна имели клиновидные заглушки, позволяющие существенно снижать амплитуду отражённых акустических сигналов менее энергетически значимого уровня (в данном случае менее 10 % номинального значения). После замены эталонного сигнала

предыскажённой копией восстановились амплитуда и форма корреляционного максимума в соответствии с ожидаемой характеристикой широкополосного импульса. В ходе эксперимента сигнал оставался стабильным и устойчиво регистрировался. При мощности излучения $W=1$ Вт принимали четыре луча с различными временными задержками и энергетически значимой амплитудой. Лучи с более высоким порядком моды имели малую амплитуду на уровне акустических шумов и не обрабатывались.

Уровни сигналов и временные задержки в прямом и обратном направлениях были почти одинаковыми, что подтверждает принцип взаимности. При этом разность временных задержек прямого и обратного хода для четырёх лучей оказалась одинаковой и соответствовала ожидаемой скорости течений. Это свидетельствует о том, что траектории лучей охватывают всё сечение реки и каждый луч может использоваться для расчёта средней скорости течения. Такой вывод согласуется с теорией волноводного распространения звука по всему сечению волновода.

Медленные изменения временных задержек прямого и обратного хода лучей с периодом около 1 мин имели коэффициент корреляции на уровне 0,7. Из этого следует, что задержки распространения сигнала в прямом и обратном направлениях изменяются синхронно, а их разность остаётся постоянной и обусловлена только скоростью течения.

Исследование влияния длительности зондирующего ЛЧМ-сигнала на точность измерения скорости течения показало, что в определённых пределах при увеличении длительности повышается точность, но не пропорционально, как следует из теории. Нарушение пропорциональной зависимости объясняется нестационарностью гидроакустического канала, приводящей к прогрессирующему искажению формы ЛЧМ-сигнала по мере увеличения его длительности. Из результатов экспериментов следует, что существует оптимум длительности сигнала, зависящий от дистанции зондирования.

Оценка затухания зондирующего сигнала в гидроакустическом канале показала, что фактическое значение β примерно на 3 дБ больше по сравнению с рассчитанными по формуле (3) из-за влияния сплошного ледяного покрова. Для обеспечения надёжного приёма сигнала и снижения флуктуаций временной задержки до ± 20 мкс (эквивалентно изменениям скорости течения до ± 3 см/с) потребовалась импульсная мощность излучения 1 Вт в полосе частот 2,5 кГц и длительность импульса 300 мс. Приёмоизлучающие гидрофоны в этом режиме имели относительно низкий КПД около 20 %. Приведённые параметры сигнала примерно соответствуют оптимальным значениям на дистанции зондирования 1000 м. В таблице приведены результаты измерений средней скорости течения v_{cp} и их среднеквадратическая погрешность (СКП), полученные методом горизонтального импульсного зондирования ЛЧМ-сигналами при следующих параметрах: $L \approx 1000$ м; $\tau = 300$ мс; $f_{cp} = 24$ кГц; $\Delta f = 2,5$ кГц; $\beta = 6,5$ дБ.

Расход воды Q вычисляется по формуле

$$Q = v_{cp} S,$$

где S – площадь живого сечения реки.

Фазовый метод зондирования проверяли только при минимальном уровне мощности излучения 0,1 Вт, так как повышение мощности не приводило к уменьшению погрешности измерения. Измеренная скорость течения с осреднением 10 мин составила 38 м/с, СКП – 3 см/с. Значительно бо́льшая погрешность измерений фазовым методом по сравнению с погрешностью импульсного метода обусловлена влиянием многолучевости сигнала. При импульсном методе зондирования обрабатывался только один доминантный по временной задержке луч. Амплитуда луча при вычислении корреляционного максимума не оказывает прямого влияния на результат измерения временной задержки сигнала. В фазовом методе зондирования возможность выбора одного луча отсутствует, поэтому результирующий сигнал является векторной суммой всех лучей, приходящих в точку приёма. При векторном суммировании флуктуации амплитуды каждого луча вносят прямой вклад в фазу суммарного сигнала.

Результаты измерения скорости течения импульсным и фазовым методами зондирования существенно различаются. Различие может объясняться сдвигом по времени наблюдений на двое суток и существованием суточного хода уровня воды в Финском заливе амплитудой около 0,5 м. Колебания уровня воды в створе устья реки приводят к изменению площади живого сечения потока и пропорциональным изменениям скорости течения при постоянстве стока реки.

Результаты измерения скорости течения в Малой Невке (в среднем 35 см/с), полученные обоими методами, сильно отличаются от данных инструментальных измерений скорости течения в фарватере – 80 см/с. Это объясняется, по-видимому, струйным характером течения в относительно глубоководном фарватере и практически отсутствием течения в мелководных окраинных зонах.

Заключение. В натурных условиях при наличии ледяного покрова были проверены два варианта метода горизонтального гидроакустического зондирования для измерения расхода воды (средней скорости течения): импульсное зондирование широкополосными ЛЧМ-сигналами и разностно-фазовое зондирование узкополосными синусоидальными сигналами. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

подтверждён волноводный характер распространения звука в реке, при котором фронт зондирующего акустического сигнала занимает всё сечение реки от дна до поверхности при условии достаточной ширины вертикальной диаграммы направленности излучателя. Следствием волноводного характера распространения звука является полный охват звуковыми лучами всего сечения реки и корректное осреднение эпюры скоростей течения по глубине и ширине;

затухание акустического сигнала, распространяющегося под ледяным покровом, превышает рассчитанное по формуле (3) значение примерно на 3 дБ/км и зависит от толщины льда и высоты снежного покрова, т. е. может потребоваться коррекция мощности излучателя в зависимости от дистанции зондирования и характеристик ледяного покрова;

импульсный метод зондирования широкополосными ЛЧМ-сигналами показал более высокую точность измерения временных задержек и, соответственно, скорости течения с СКП 1,8 см/с. Недостатком импульсного метода зондирования являются значительные искажения формы сигнала по причи-

Результаты измерений средней скорости течения методом горизонтального импульсного зондирования

W, Вт	Количество лучей (мод) при Δf , кГц			S/N, отн. ед	$v_{\text{ср}}$, см/с	СКП, см/с
	1,0	2,5	5,0			
0,1	1	1	0	~0,5	15–40	~10,0
0,5	3	3	1	2,0	20–35	5,0
1,0	4	4	2	3,0	32	1,8

не несогласованности фазочастотных характеристик приёмо-излучающих гидрофонов со спектром ЛЧМ-сигнала;

фазовый метод зондирования узкополосными сигналами синусоидальной формы обеспечивает СКП 3 см/с, но обладает повышенной (примерно в 3 раза) дистанционностью зондирования при одинаковой мощности излучения за счёт повышения отношения сигнал–шум в узкой полосе частот.

Таким образом, подтверждена работоспособность метода горизонтального гидроакустического зондирования для измерений расхода воды и определены характеристики зондирующих сигналов в зависимости от ширины и глубины реки, а также от гидрологических и погодных условий. Полученные оценки погрешности измерений показывают, что при надлежащем выборе параметров аппаратуры и методов обработки гидроакустического сигнала точность измерения расхода речного стока может быть не ниже точности традиционного метода измерений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках прикладных научных исследований по федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», Соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0009 от 05.06.2014 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0009).

Литература

1. **МИ 1759–87. ГСИ.** Расход воды в реках и каналах. Методика выполнения измерений методом «скорость–площадь».
2. **Измерение** расхода воды. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Ч. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1975. С. 103–115.
3. **Храбров А. А.** Исследования метрологических характеристик акустических доплеровских профилографов скорости течения: Автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук. СПб., 2004.
4. **Woodward W. E., Appel G. F.** Current velocity measurements using acoustic Doppler backscatter: A review //

IEEE Ocean. Eng. 1986. V. 11. No. 1. P. 36–41. DOI: 10.1109/JOE.1986.11451474.

5. Schaudt K. J., Hamilton R. C., Grossman D. Doppler acoustic current measurements in high currents // IEEE OCEANS '86. 1986. 27 p. DOI: 10.1109/OCEANS.1986.1160473.

6. Морозов А. Н., Лемешко Е. М. Опыт использования акустических доплеровских измерителей течения (ADCP) в условиях Черного моря // Труды МГИ. Севастополь. 2005. С. 457–476.

7. Гордин О. А., Михин Д. Ю. Акустическая томография океанских течений по методу согласованной невзаимности // Акустический журнал. 1996. Т. 47. № 4. С. 501–509.

8. Машонин А. И. Практические задачи гидроакустики, решаемые с использованием алгоритмов обработки сигнала,

согласованных со средой их распространения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т.10. № 1. С. 37–48.

9. Глушнев В. Д., Панов М. М. Тенденции совершенствования современных ультразвуковых расходомеров // Вестник Московского энергетического института. 2018. № 3. С. 94–100.

10. Евтютов А. П. Волновые модели гидроакустических процессов и полей. Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. С. 133–140.

11. Физическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1988. Т. 1. Волновод акустический. С. 306–307.

12. Тюрин А. М., Сташкевич А. П., Таранов Э. С. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1966.

Дата принятия: 19.10.2018.

Horizontal hydroacoustic sounding method of water flow measurement in rivers with ice cover

R. A. Balakin, V. E. Golavskii

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia, e-mail: rigms@aari.ru

The studies' purpose was to experimentally test the horizontal hydroacoustic sounding method of water flow measurement for ice-covered rivers. Two alternative methods have been tested: impulsive sounding by broadband signals with linear frequency modulation and difference-phase sounding with narrow-band sinusoidal signal. The field experiments performed have proved the working efficiency of the horizontal hydroacoustic sounding method of water flow measurement, and also have allowed defining the characteristics of sounding signals and the order of magnitude of metering errors.

Key words: hydroacoustics, river flow rate, metering error, acoustic sounding, multipath effect, ice cover.