

## ОБ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ПРИДОННЫХ ТЕЧЕНИЙ

**Пака В.Т., Набатов В.Н., Кондрашов А.А., Корж А.О., Подуфалов А.П.,  
Облеухов С.Д., Голенко М.Н., Щука С.А.**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [vpaka@mail.ru](mailto:vpaka@mail.ru)*

Статья поступила в редакцию 15.04.2019, одобрена к печати 30.05.2019

В статье описана усовершенствованная конструкция инклинометрического измерителя скорости придонных течений (ИСПТ), разработанная в АО ИРАН. Данный тип измерителей используется последние годы, главным образом, за рубежом вследствие невысокой стоимости, простоты изготовления и возможности тиражирования. В большинстве конструкций прибор представляет собой физический «маятник» в форме длинного плавучего цилиндра, прикрепленный к неподвижной платформе и отклоняющийся от вертикали под действием гидродинамической силы набегающего потока. Угол отклонения пересчитывается в скорость потока по показаниям акселерометра. Основным недостатком существующих образцов является наличие помех в измерениях вследствие поперечных автоколебаний цилиндра в стабильном потоке при образовании вихрей Кармана. В усовершенствованной конструкции герметичный контейнер с блоком электроники и дополнительный элемент плавучести помещены во внешнюю жесткую оболочку. Оболочка изготовлена из цилиндрической пластиковой трубы с площадью перфорации стенок 55%. Наличие перфорированной оболочки эффективно демпфирует возникновение поперечных колебаний в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Для разработанной конструкции приводятся простые расчетные соотношения, позволяющие выполнить оценку диапазона измерения и чувствительности измерителя на основе его геометрических и массовых параметров. Усовершенствованная конструкция ИСПТ предназначена в первую очередь для проведения измерений слабых придонных течений, хотя существует возможность регулирования чувствительности для измерений в волноприбойной зоне моря. Диапазон скоростей измеряемых придонных течений составляет 3–56 см/с при максимальной относительной погрешности в 25% для малых скоростей и 3–5% для больших скоростей.

**Ключевые слова:** измеритель скорости течений, придонное течение, кластер, гидродинамическое давление, поток, число Рейнольдса

В последние годы за рубежом получил развитие метод измерения скорости течений с помощью недорогих приборов, регистрирующих наклон вертикальной оси под действием горизонтального потока – Tilt Current Meter (TCM) (Короткина и др., 2014; Sheremet, 2010; Hansen et al., 2017). Аналогичные измерители скорости придонных морских течений (ИСПТ) стали разрабатываться и использоваться в российских морских исследованиях (Баранов и др., 2018). TCM и ИСПТ представляют собой физический маятник с закрепленной относительно

дна точкой подвеса, устанавливающийся в неподвижной воде вертикально под действием положительной или отрицательной плавучести и отклоняющийся от вертикали силой гидродинамического давления на тело маятника в направлении набегающего потока до достижения равновесия моментов гидродинамической и архимедовой сил. Информацию о скорости и направлении течения дают измеряемые угол и направление отклонения, для чего обычно используются трехкомпонентные акселерометры и магнитометры, размещаемые неподвижно внутри тела маятника вместе с электронным блоком управления и накопления данных.

Используя имеющийся опыт построения аналогичных измерителей, в АО ИОРАН была выполнена собственная разработка ИСПТ. В рамках этой работы проводились испытания различных конструктивных решений, включая натурные эксперименты, позволившие выбрать вариант, представляющийся нам в данный момент наиболее удачным, что отнюдь не означает, что мы считаем его окончательным. Выбор конструктивных параметров измерителя базировался на следующих основных требованиях:

- высокая чувствительность прибора и достаточная точность при измерении скоростей порядка единиц см/с, что продиктовано необходимостью оценки реально низких пороговых скоростей взмучивания неконсолидированных донных отложений;

- возможность изменения чувствительности прибора для обеспечения измерений в нескольких диапазонах, включая диапазон скоростей порядка 1 м/с и более, актуальный при измерениях в волноприбойной зоне;

- отсутствие автоколебаний в потоке и других помех в стационарном течении, минимальный вклад в выходной сигнал переходных процессов, как электрической, так и механической природы;

- технологичность и невысокая стоимость изделия.

Основное внимание было уделено форме и конструкции тела маятника, при обтекании которого обеспечивается полное демпфирование автоколебаний без ухудшения чувствительности, стабильности показаний и инерционных характеристики измерителя. По результатам испытаний был выбран вариант, схема которого представлена на рис. 1.

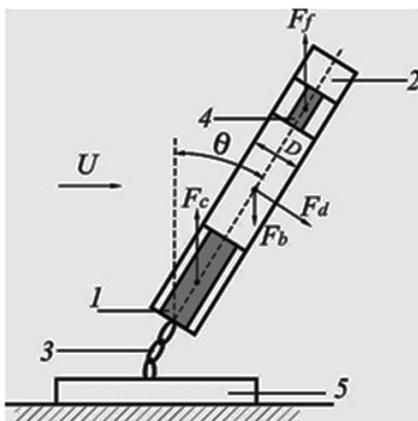


Рис. 1. Упрощенная схема ИСПТ: 1 – гермоконтейнер с электроникой, 2 – жесткая перфорированная оболочка, 3 – шарнирное крепление подвеса, 4 – поплавок, 5 – груз – подставка,  $U$  – скорость набегающего потока,  $F_d$  – сила гидродинамического сопротивления,  $F_c$  – равнодействующая гидростатической силы и силы тяжести гермоконтейнера,  $F_b$  – равнодействующая гидростатической силы и силы тяжести оболочки (отрицательная плавучесть),  $F_f$  – равнодействующая гидростатической силы и силы тяжести поплавка.

Прибор построен по модульному принципу. Каркасом модульной сборки является цилиндрическая оболочка, изготовленная из трубы ПВХ с перфорированными стенками. Внутри оболочки соосно размещены приборный модуль – гермоконтейнер с постоянной положительной плавучестью, и модуль плавучести – дополнительный поплавок, необходимый для регулирования результирующего момента сил плавучести. Подвижная часть прибора прикреплена с помощью подвеса к тяжелому неподвижному грузу – платформе. В качестве подвеса используется короткая металлическая цепочка, состоящая из нескольких звеньев, позволяющая телу маятника отклоняться от вертикали на угол до 60–70° в любом азимутальном направлении без соприкосновения с платформой. Массивные элементы находятся внутри гермоконтейнера. Все элементы сборки, за исключением подвеса, выполнены из материалов с плотностью, близкой к плотности воды.

Полный угол отклонения от вертикали  $\theta$  может быть пересчитан в скорость набегающего горизонтального потока  $U$  через экспериментально полученную градуировочную кривую, представленную в виде, предложенном Хансенем (Hansen et al., 2017):

$$U = k \sqrt{\frac{tg\theta}{\cos\theta}}, \quad (1)$$

где  $k$  – размерный параметр, в который входят физические и геометрические параметры ИСПТ, а также коэффициент гидродинамического сопротивления тела  $C_d$ :

$$k = \sqrt{\frac{M_{max}}{\rho C_d A L}}, \quad (2)$$

где  $M_{max}$  – максимальный восстанавливающий момент при  $\theta$ , равном 90°,  $A$  – площадь продольного сечения измерителя,  $L$  – эффективное плечо суммы сил тяжести и плавучести оболочки и вложенных модулей.

Коэффициент  $C_d$  зависит главным образом от числа Рейнольдса  $Re$ , от соотношения высоты и диаметра цилиндра, шероховатости поверхности и наличия перфорации. Согласно экспериментальным исследованиям по поперечному обтеканию бесконечно длинного гладкого цилиндра, в диапазоне чисел  $Re = 1 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5$  коэффициент  $C_d \approx 1.2$ . Конечная длина цилиндра снижает значение  $C_d$ : при уменьшении отношения  $L/d$  от 10 до 1 и  $Re = 9 \cdot 10^4$  величина  $C_d$  падает от 0.82 до 0.63, т.е. приближается к значению  $C_d = 0.5$  для шара. Наличие перфорированной оболочки также влияет на этот коэффициент. В работе (Alridge et al., 1978) выполнены измерения  $C_d$  для цилиндра с площадью перфорации 60% и  $L/d = 2.7 \div 7.9$  в диапазоне чисел  $Re = 4.3 \cdot 10^4 \div 2.6 \cdot 10^5$ . Значения  $C_d$  росли с увеличением  $L$  от 0.88 до 0.96. По сравнению со случаем гладкого цилиндра перфорация увеличивала удельное сопротивление примерно на 20%. При этом вихревой дорожки Кармана и поперечных автоколебаний не наблюдалось во всем диапазоне изменения  $L$  и  $Re$ .

При условии, что  $C_d$  является постоянным, параметр  $k$  можно считать универсальным параметром для любых ИСПТ цилиндрической формы. Он равен значению скорости потока, при котором угол отклонения ИСПТ от вертикали

составляет примерно  $39^\circ$ , т.е. его легко определить графически из экспериментально полученной зависимости (1).

Из нелинейного характера зависимости  $U$  от  $\theta$  следует наличие значительных ошибок при определении скоростей потока на краях диапазона угла отклонения: вблизи нуля и вблизи  $90^\circ$ . В связи с этим, исходя из допустимых ошибок измерений, для ИСПТ целесообразно определять нижнюю и верхнюю границы диапазона измерений скорости. По результатам испытаний ИСПТ в опытовом бассейне целесообразно принять максимальный угол отклонения  $\theta_{\max} = 70^\circ$ . Для данного значения угла верхнее значение диапазона скорости составляет  $2,8 k$ .

Относительные ошибки определения скоростей течений при малых углах отклонений определяются в основном абсолютной ошибкой измерений углов. На основании паспортных данных применяемых типов акселерометров и экспериментальных определений стабильности их показаний разумной оценкой погрешности измерения угла наклона можно считать величину в  $0,6^\circ$ . Для такой погрешности измерения угла наклона на рис. 2 представлен график относительной погрешности измерения скорости, рассчитанной с помощью (1) до  $\theta_{\max} = 70^\circ$ . При приближении угла  $\theta$  к  $90^\circ$  погрешность почти линейно растет, поэтому при бассейновых испытаниях чувствительность ИСПТ регулировалась таким образом, чтобы при максимальных ожидаемых скоростях прибор отклонялся на угол не более  $70^\circ$ , соответственно максимальная погрешность на краю диапазона будет ниже 20%.

Из рис. 2 следует, что в диапазоне скоростей  $(0,5 \div 2,8)k$  относительная погрешность измерения скорости не превышает 3%, что в первом приближении

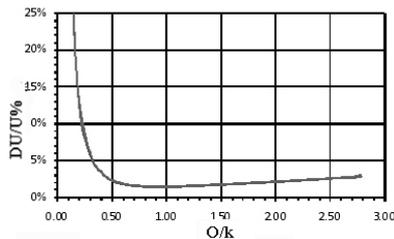


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности  $\Delta U/U$  от нормированной средней скорости течения  $U/k$  для погрешности измерений угла наклона  $\Delta\theta = 0,6^\circ$ .

приемлемо. Однако при еще более малых скоростях течений погрешность быстро растет и границу нижнего диапазона скоростей целесообразно определить, исходя из ее допустимого уровня. Принимая в качестве такого уровня 25%, получим нижний предел диапазона скоростей  $0,14 k$ . Таким образом, задаваемые уровни ошибок определяют чувствительность измерителя и диапазон измерения скоростей течений через параметр  $k$ . Рекомендуемая нижняя граница диапазона составляет  $0,14 k$ , верхняя –  $2,8 k$ .

Общий вид изготовленного ИСПТ представлена на рис. 3. Оценка  $k$  из (2) составила около  $0,2$  м/с, что определяет диапазон скоростей измеряемых придонных течений  $3\text{--}56$  см/с.

Градуировка партии ИСПТ проводилась в опытовом бассейне Калининградского Государственного технического университета глубиной  $4$  м, шириной

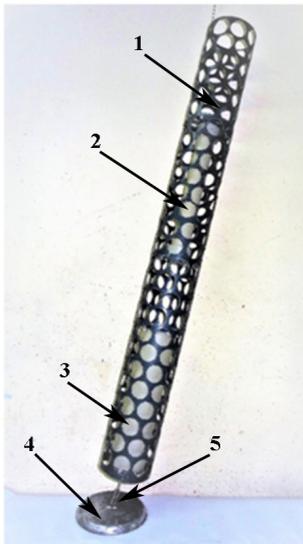


Рис. 3. Конструкция ИСПТ. 1 – перфорированная оболочка (длина 1 м, диаметр 0.11м), 2 – модуль дополнительной плавучести (поплавков), 3 – приборный модуль, 4 – донный груз (2 кг), 5 – подвес (цепочка).

10 м и длиной 25 м. Измерители в количестве до 7 шт. закреплялись на буксировочной платформе. Измерения углов отклонения измерителей проводились при 10 значениях скорости пробега тележки в диапазоне 0,05–0,53 м/с. Результаты градуировки представлены на рис. 4.

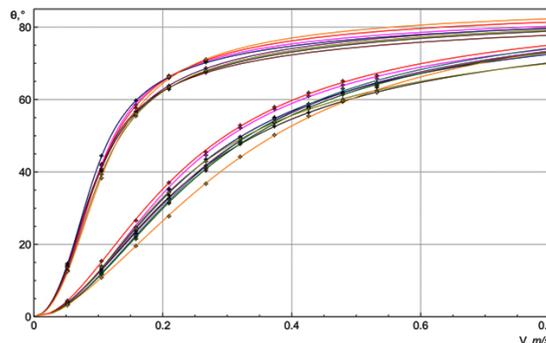


Рис. 4. Примеры градуировочных кривых для партии ИСПТ. Верхняя группа графиков получена при установке поплавка вплотную к приборному модулю, нижняя группа – при установке поплавка вблизи верхнего края оболочки, как показано на рис. 3.

Кроме градуировки, задачей бассейновых измерений была проверка соотношения (1). Рассчитанные углы отклонений для каждого ИСПТ были пересчитаны в значения переменной  $\sqrt{(\operatorname{tg}\theta/\cos\theta)}$  и нанесены на графики совместно с нормированными скоростями  $U/k$ . Экспериментальное значение  $k$  в соответствии с (1) определялось для каждого измерителя как угловой коэффициент линейной регрессии. Диапазон значений  $k$  составил 0,19–0,28 м/с и был связан с разбросом конструктивных параметров, в основном размеров поплавка и его положения внутри оболочки. Эти значения были использованы для построения сводного графика на рис. 5. Явно заметна нелинейность расположения экспериментальных точек, хотя в целом характер нелинейности одинаков во всем указанном диапазоне  $k$ . Нелинейность графика свидетельствует об плавном уменьшении фактического параметра  $k$  вследствие увеличения  $C_d$  при увеличении угла отклонения. Тем

не менее, зависимость поведения  $C_d$  от конструктивных параметров оболочки (отношения длины к диаметру и площади перфорации) требует более детального изучения с целью создания конструкции с постоянным параметром  $k$ .

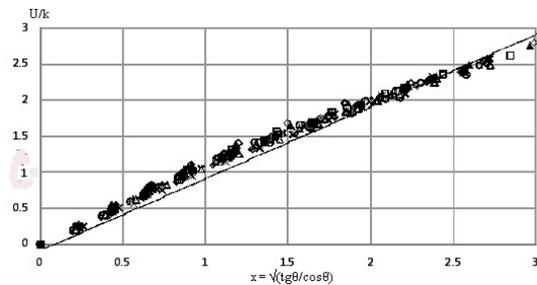


Рис. 5. Результаты градуировки в бассейне 20 экземпляров ИСПТ. Показана линия линейного тренда.

Удобство использования параметра  $k$  состоит также в возможности проведения градуировки ИСПТ с ограниченным числом прогонов буксировочной платформы на скоростях, при которых угол отклонения близок к  $39^\circ$ . С помощью (2) параметр  $k$  можно рассчитать для каждого измерителя, используя его геометрические и массовые характеристики.

Возможности разработанной модели ИСПТ можно оценить по результатам натурных испытаний. Измерения проводились в прибрежной зоне вблизи пос. Янтарный Калининградской области на глубинах 25, 35 и 45 м в период с 16.11.18 по 14.12.18 (последний прибор отключился из-за падения напряжения питания 07.12.18). Данные на всех трех приборах регистрировались с частотой 5 Гц, что позволяет регистрировать колебания скорости в придонном слое с периодами развитых поверхностных волн. Чтобы анализировать течения без вклада поверхностного волнения (а в глубоком море – без вклада придонной турбулентности), применялось сглаживание. На рис. 6 представлено сглаженное течение – осредненные за 2 ч. векторы течений в указанных точках, а также векторы ветра, с интервалом 6 ч. на каждый день наблюдений, полученные из Базы данных ECMWF (European Centre for Medium – Range Weather Forecasts – [www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)).

Приведенный пример демонстрирует пространственную и временную изменчивость течения в зависимости от локальных погодных условий и прочих, не учтенных факторов. Различия между точками наблюдения оказались заметными, причиной тому могут быть и разные расстояния от берега, и разные глубины. Бросается в глаза возрастание скорости вдольбереговых течений, что соответствует направлению береговой черты с юга на север.

Характер внутрисуточной и более медленной изменчивости под влиянием синоптических факторов будет представлен в отдельной статье. Здесь же мы ограничимся только оценкой достоверности полученных данных и с этой целью рассмотрим структурные особенности непрерывных записей, представленных на рис. 7. Это 5-минутные записи течений в точке на глубине 25 м, выбранные в начале суток 19-го, 30-го ноября и 5-го декабря, когда ветер был сильным и имел различные направления: с востока, юга и запада. Первое, что следует отметить, это отсутствие автоколебаний в первичном сигнале.

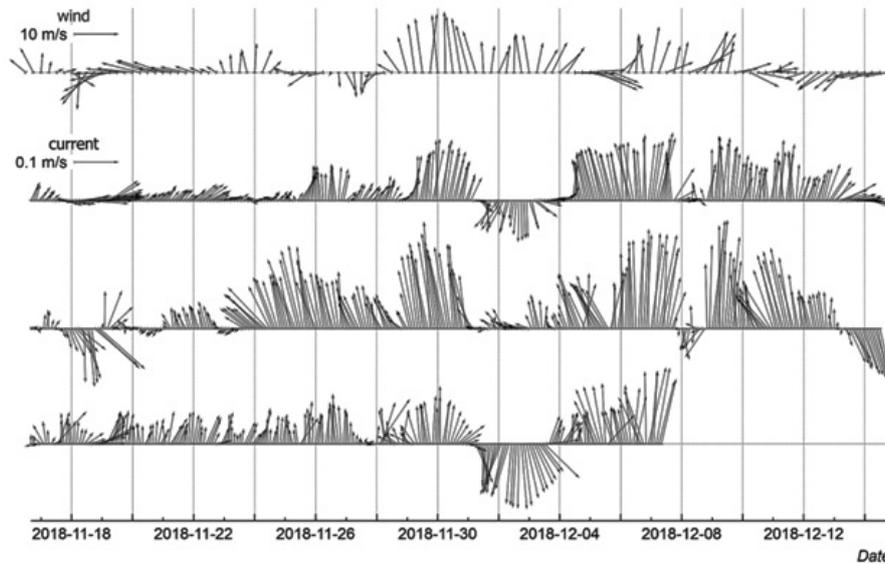


Рис. 6. Пример измерений придонных течений в прибрежной зоне в районе пос. Янтарный Калининградской области 16.11.–14.12.2018. Вверху: ежесуточный ветер. Ниже: векторы придонных течений на глубинах 25, 35 и 45 м. Масштабные отрезки соответствуют скорости ветра 10 м/с и скорости течения 0.1 м/с. Направление на север – вверх.

Проявляющиеся на всех записях модуля скорости и направления течения периодические колебания соответствуют периодам поверхностных волн. Размах этих колебаний не превышает или близок к скорости среднего течения, в данном случае менявшегося в пределах 0.10–0.15 м/с. Разумеется, орбитальные скорости ветровых волн вблизи поверхности моря в это время были несопоставимо большими. Представляется закономерными и различия в амплитудах квазиволновых колебаний придонной скорости при различных направлениях ветра. Очевидно, что самое сильное волнение должно быть при нагонном западном ветре, что и наблюдается. Различия между восточным и южным ветром объяснить сложнее, в обоих случаях должны проявляться близость берега и ограниченность разгона. В дальнейших исследованиях в прибрежной зоне понадобится дополнительная информация и по полю ветра, и по полю волнения, и по структуре поля течений. Последняя задача может быть решена с помощью предложенных нами ИСПТ, испытания которых мы считаем успешными.

Кроме прибрежной зоны, испытания новых приборов проводились в центральных районах Балтики. Там приборы выставлялись компактной группой, чтобы по степени сходства записей проверить стабильность метрологических параметров. Данная проверка также прошла успешно. Одновременно было получено подтверждение правильности выбора диапазона измеряемых скоростей – до 60 см/с. С такой настройкой можно приступать к продолжительным полигонным экспериментам, в которых планируется использование десятков ИСПТ.

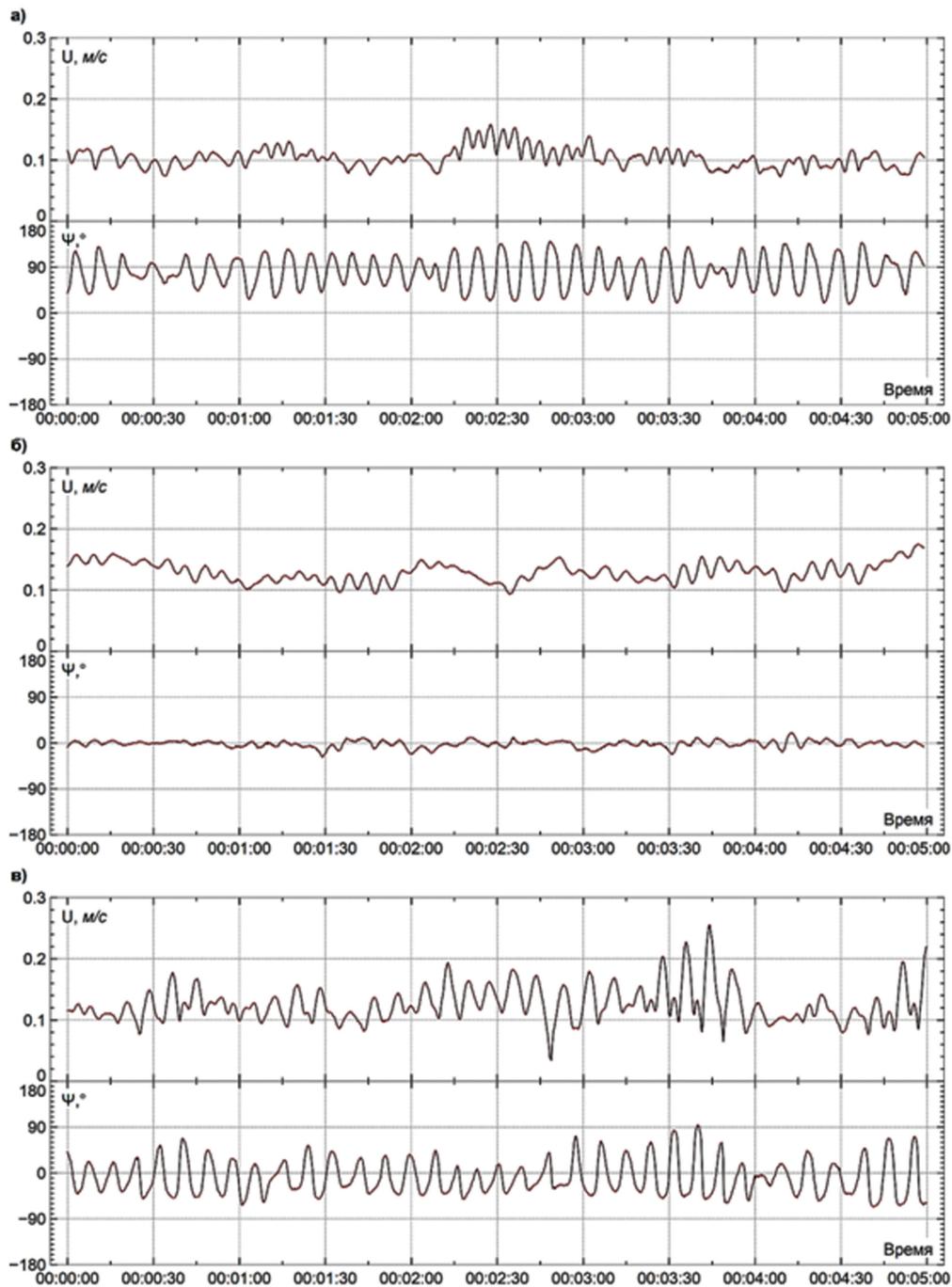


Рис. 7. Пятиминутные выборки из записей скорости придонного течения на глубине 25 м в начале суток 19.11.2018 при восточном ветре (а), 30.11.2018 при южном ветре (б) и 05.12.2018 при западном ветре (в),  $U$  – модуль скорости течения,  $\Psi$  – азимутальное направление скорости.

Расчет и анализ придонных скоростей, измеренных инклинометрами, выполнены в рамках государственного задания ИО РАН (тема госбюджета № 0149-2019-0013); производство инклинометров, их постановка в море и снятие – выполнены при поддержке РФФИ (грант 284 № 17-05-41196); разработка конструкции инклинометров, теоретические расчеты для обоснования их применимости к решению поставленных задач и оценки погрешности измерений, а также их градуировка в

Пака В.Т. и др.

лабораторном бассейне выполнены при поддержке РФФИ (грант № 18-05-80031); анализ изменчивости течений в зависимости от локальных географических факторов выполнен при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00962); доклад о результатах измерений инклинометров на международной конференции выполнен при поддержке EU INTERREG Baltic Sea Region Programme 2014–2020, Project DAIMON (Decision Aid for Marine Muniton) – совместный европейский проект «Помощь в принятии решений по проблеме химоружия в море».

### Литература

- Баранов В.И., Очередник В.В., Зацепин А.Г., Куклев С.Б., Маишур В.В.* Предварительные результаты натурных испытаний измерителя скорости придонного течения в прибрежной зоне моря // Научно-практический электронный журнал «Аллея Науки». 2018. № 5(21).
- Короткина О.А., Завьялов П.О., Осадчиев А.А.* Синоптическая изменчивость течений в прибрежной акватории Сочи // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 581–593.
- Alridge T.R., Piper B.S., Hunt J.C.R.* The drag coefficient of finite-aspect-ratio perforated circular cylinders // Journal of Industrial Aerodynamics. 1978. No. 3. P. 251–257.
- Hansen A.B., Carstensen S., Christensen D.F., Aagaard T.* Performance of a tilt current meter in the surf zone // Coastal Dynamics. 2017. No. 218. P. 944–954.
- Sheremet V.A.* SeaHorse tilt current meter: inexpensive near bottom current measurements based on drag principle with coastal applications // Eos Transactions American Geophysical Union. Ocean Sci. Meet. 2010. Vol. 91. No. 26. Abstract PO25C13.

### ON THE IMPROVEMENT OF THE TILTING BOTTOM CURRENT METER

**Paka V.T., Nabatov V.N., Kondrashov A.A., Korzh A.O., Podufalov A.P.,  
Obleukhov S.D., Golenko M.N., Shchuka S.A.**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [vpaka@mail.ru](mailto:vpaka@mail.ru)  
Submitted 15.03.2019, accepted 30.05.2019*

The article describes the advanced design of Tilt Current Meter (TCM), developed in the Shirshov Institute of Oceanology. This type of meters is used in recent years mainly in Western countries due to low cost, ease of manufacture and the possibility of replication. In most designs the device is a physical pendulum in the form of a long floating cylinder attached to a stationary platform and deviating from the vertical in the action of hydrodynamic force. The tilt is recalculated to the flow rate by the accelerometer signals. The main drawback of the existing samples is the presence of contaminating signals in measurements due to transverse auto – oscillations of the cylinder in a stable flow in the formation of vortices wake. In the advanced design the watertight container with the electronics block and the additional element of buoyancy are placed in an external rigid shroud. The shroud is made of cylindrical plastic pipe with a wall perforation area of 55%, this measure effectively prevents the appearance of transverse oscillations in a wide range of Reynolds numbers. For the developed design the simple calculation ratios allowing to carry out estimation of a measuring range and

sensitivity of the meter on the basis of its geometrical and mass parameters are given. The improved design of the ISTT is primarily intended for the measurement of weak bottom currents, although it is possible to regulate the sensitivity for measurements in the surf zone. The range of measured bottom current velocities is 3–56 cm/s with a maximum relative error of 25% for small velocities and 3–5% for maximum velocities.

**Keywords:** tilt current meter, bottom current, cluster, inclinometer, hydrodynamic tension, flow, Reynolds number

### References

- Alridge T.R., Piper B.S., and Hunt J.C.R.* The drag coefficient of finite-aspect-ratio perforated circular cylinders. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 1978, No. 3, pp. 251–257.
- Baranov V.I., Ocherednik V.V., Zatselin A.G., Kuklev S.B., and Mashura V.V.* Preliminary results of field tests of a tilt current meter in coastal zone of the sea. *Scientific-practical electronic journal Alley-Science*, 2018, No. 5(21).
- Hansen A.B., Carstensen S., Christensen D.F., and Aagaard T.* Performance of a tilt current meter in the surf zone. *Coastal Dynamics*, 2017, No. 218, pp. 944–954.
- Korotkina O.A., Zavalov P.O., and Osadchiv A.A.* Synoptic variability of currents in the coastal waters of Sochi. *Oceanology*, 2014, Vol. 54, No. 5, pp. 545–556, doi:10.1134/S0001437014040079.
- Sheremet V.A.* SeaHorse tilt current meter: inexpensive near bottom current measurements based on drag principle with coastal applications. Eos Transactions American Geophysical Union. *Ocean Sci. Meet.*, 2010, Vol. 91, No. 26, Abstract PO25C13.