

## Модернизация измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования циркуляций Ленгмюра и обрушений поверхностных волн в Черном море

М. И. Павлов\*, А. М. Чухарев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*e-mail: mixail.pavlov.1993@mail.ru

Поступила: 16.01.2020 г.; принята к публикации 17.02.2020 г.; опубликована 25.03.2020 г.

Целью статьи является описание модернизации измерительного комплекса «Сигма-1», проведенной для повышения качества исследования механизмов обрушения волн и циркуляции Ленгмюра на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института. Рассматривается влияние собственных колебаний прибора и изменения положения его корпуса на измеренные компоненты вектора скорости течения. Собственные колебания прибора регистрируются системой контроля положения, состоящей из микроконтроллерного устройства и набора датчиков: акселерометров, магнитометра. Модельное исследование допустимых вращений и максимальных углов наклона показало, что при отсутствии датчика угловых скоростей нескорректированные измеренные компоненты вектора скорости течения могут существенно отличаться от фактических. Для учета влияния собственных колебаний прибора на измеряемые гидрофизические характеристики была разработана система контроля положения, оснащенная модулем MPU-9250 с акселерометром, гироскопом и магнитометром, а также микроконтроллерной системой *Arduino Nano*. В среде программирования *Arduino IDE* на основании теории расчета пространственных углов была разработана программа коррекции измеренных компонент пульсаций скорости для MPU-9250. Подобрана оптимальная программа для калибровки магнитометра – *Magneto* – как наиболее точная и удовлетворяющая условиям применения на океанографической платформе. Описаны основные этапы калибровки датчиков. Измеренные в системе координат комплекса «Сигма-1» компоненты скорости течения корректируются с учетом значений углов наклона, угловых и линейных скоростей, расчет выполняется по методу *eddy correlation*. Разработанная система проверена на специализированном оборудовании в лабораторных условиях и имеет следующие характеристики: в диапазоне  $-30...+30^\circ$  максимальная погрешность по дифференту составляет  $0.31^\circ$ ; максимальная погрешность по крену –  $0.42^\circ$ ; максимальная погрешность компаса –  $2.09^\circ$ . Достигнутые характеристики позволяют заметно повысить точность измерения вектора скорости и достоверность оценки влияния различных физических процессов на вертикальный обмен.

**Ключевые слова:** циркуляции Ленгмюра, обрушения волн, контактные методы, навигационная система, калибровка МЭМС, коррекция измерений, *eddy correlation*, MPU-9250, AK8963C.

© Павлов М. И., Чухарев А. М., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0003.

**Для цитирования:** Павлов М. И., Чухарев А. М. Модернизация измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования циркуляций Ленгмюра и обрушений поверхностных волн в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 129–148. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-129-148

## **Improvement of the SIGMA-1 Measuring Complex for Studies of Langmuir Circulations and Surface Wave Breaking in the Black Sea**

**M. I. Pavlov\*, A. M. Chukharev**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

*\*e-mail: mixail.pavlov.1993@mail.ru*

Submitted 16.01.2021; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

The purpose of this article is to describe modernization of SIGMA-1 measuring complex. The modernization was performed to improve the quality of research of the wave breaking mechanisms and Langmuir circulations at the stationary oceanographic platform MHI. The article deals with the effects of natural oscillations of the device and changes in the housing position on the measured components of the flow velocity vector. The device natural oscillations are recorded by a position monitoring system consisting of a set of sensors: accelerometers and a magnetometer. A model study of permissible rotations and maximum tilt angles showed that in the absence of an angular velocity sensor, the uncorrected measured components of the flow velocity vector can differ significantly from the actual ones. To solve this problem, MPU-9250 module with an accelerometer, gyroscope and magnetometer was chosen; Arduino Nano was used as a microcontroller system. Based on the theory of calculating spatial angles, a program for correcting the measured components of velocity pulsations for the new module was developed in Arduino IDE programming environment. The optimal program (Magnet) for calibrating the magnetometer was selected as the most accurate and satisfying the conditions of use at the oceanographic platform. The main stages of sensor calibration are described. The flow velocity components measured in the device coordinate system are adjusted for the values of tilt angles, angular and linear velocities, the calculation is performed using the eddy correlation method. The developed system has been tested on specialized equipment in laboratory setting and has the following characteristics: within the range  $-30...+30^\circ$  the maximum pitch error is  $0.31^\circ$ ; the maximum roll error is  $0.42^\circ$ ; the maximum magnetometer error is  $2.09^\circ$ . The achieved characteristics allow significant increase in the accuracy of measuring the velocity vector and reliability estimate of influence of various physical processes on the vertical exchange.

**Keywords:** Langmuir circulations, wave breaking, contact research methods, navigation system, MEMS calibration, eddy correlation method, MPU-9250, AK8963C.

**Acknowledgments:** The work was performed within the framework of the state task on the theme No. 0827-2018-0003.

**For citation:** Pavlov, M.I. and Chukharev, A.M., 2021. Improvement of the SIGMA-1 Measuring Complex for Studies of Langmuir Circulations and Surface Wave Breaking in the Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 129–148. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-129-148 (in Russian).

## Введение

Турбулентность в приповерхностном слое моря влияет на многие гидрофизические процессы: вертикальное перемешивание, перенос взвесей и биогенных веществ, нагрев или выхолаживание верхних слоев, а также интенсивность взаимодействия атмосферы и океана. К основным механизмам генерации турбулентности относятся поверхностное волнение, обрушение поверхностных волн, сдвиг скорости дрейфового течения, дрейф Стокса [1]. Численные методы достаточно неплохо параметризуют основные источники турбулентности в приповерхностном слое, однако при возникновении циркуляции Ленгмюра рассчитанная скорость диссипации турбулентной энергии в моделях может значительно отличаться от измеренной в натуральных экспериментах.

Чтобы исследовать турбулентные процессы контактными методами, применяют приборы с чувствительными к скорости потока датчиками. Такие приборы можно разделить на векторные, компонентные, дрейфующие (дрифтеры). Векторные приборы используются для мониторинга фоновых явлений, с их помощью измеряют осредненные характеристики гидрофизических полей. Компонентные приборы более точные и чувствительные, их можно разделить на гидроакустические и электромагнитные. Гидроакустические приборы, такие как *ADCP*, могут быть использованы для измерения средних и пульсационных значений гидрофизических полей. Акустические преобразователи позволяют измерять скорость течения в диапазоне  $10^{-2}$ –5 м/с. С помощью компонентных приборов электромагнитного типа можно измерять среднюю скорость течения в диапазоне  $10^{-2}$ –10 м/с, мгновенную скорость в пределах  $10^{-3}$ – $4 \cdot 10^{-1}$  м/с в частотном диапазоне 1–40 Гц. Методы применения перечисленных типов устройств зависят от исследуемых гидрофизических процессов.

Для исследования механизма обрушения волн в качестве основного инструмента используются зондирующие либо буксируемые приборы. В экспериментах на оз. Онтарио по программе *WAVES (Water Air Vertical Exchange Studies)* [2] данные были получены с помощью трех измерителей:

- 1) датчика сферической формы диаметром 4 мм, расположенного на 0.4-миллиметровом стержне, измеряющего вертикальную и горизонтальную компоненты (частота – до 20 Гц);
- 2) акустического измерителя течений (измерения проводились на частоте 20 Гц, а при записи данные усреднялись до частоты дискретизации 5 Гц);
- 3) двухосевого доплеровского лазерного измерителя скорости (*LDV*).

По этим данным было определено, что поток энергии от волн зависит от их спектрального состава и степени развития. В эксперименте *SWADE (Surface Waves Dynamic Experiment)* [3, 4] для определения скорости диссипации турбулентной энергии около побережья Мэриленда, недалеко от м. Гаттерас, измерялись с судна следующие параметры:

- 1) волновые спектры (с учетом направления) при помощи шести струнных измерителей;
- 2) атмосферные потоки тепла, импульса, водяных паров;
- 3) скорость поверхностного течения.

Учитывались колебания судна (шесть степеней свободы) для корректировки результатов измерений. Датчики волнения располагались на расстоянии

2 м от носа судна. Данные о диссипации получены акустическим прибором *Minilab SD-12*, измеряющим три компоненты скорости. Все каналы прибора работали с частотой, не превышающей 20 Гц. Скорость диссипации энергии рассчитывалась по инерционному участку спектров скорости. В работах Р. Д. Геммрича и Д. М. Фармера [5–7] использовался плавучий буй с четырьмя датчиками электропроводности и четырьмя термисторами (с постоянной времени 7 мс), расположенными на глубинах от 0.17 до 0.67 м. Частота измерений – 32 Гц. Видеокамеры сканировали измеряемую область выше и ниже поверхности воды, метеоданные были получены с другого буя, скорость ветра составляла ~ 14 м/с. По изменению электропроводности идентифицировались обрушения. Только 28 % фактических обрушений проявлялись как заметная температурная аномалия. Скорости пузырьков воздуха, движущихся вниз, оценивались в 0.4–1.9 м/с с медианой 0.9 м/с<sup>1)</sup>.

Циркуляции Ленгмюра представляют собой массив вихрей чередующихся знаков с горизонтальными осями, ориентированными вдоль направления ветра. Циркуляции образуют набор «ячеек», ограниченных ветровыми полосами. Чтобы параметризовать физический процесс, необходимо регистрировать изменения гидрофизических параметров и определять зоны конвергенции и дивергенции. Р. А. Веллер проводил такие наблюдения на платформе *Flip*, используя вертикальные профилометры и измерители течений векторного типа [8, 9]. Благодаря этим исследованиям удалось визуально определить трехмерное течение в поверхностном смешанном слое океана, в котором обнаружены относительно узкие области нисходящего течения, совпадающие с полосами сходящегося поверхностного течения. Используя гидролокатор интенсивности обратного рассеивания и доплеровский гидролокатор, Л. Зедел и Д. Фермер [10] продемонстрировали связь между горизонтальными пузырьковыми полосами и нисходящими проникающими пузырьковыми облаками, обнаруженными вертикально направленным лучом гидролокатора. Одновременные боковое и направленное вверх сканирование позволило выявить пузырьковые полосы на поверхности и погрузить их вглубь. Скорость перемещения полос определялась дрейфующим поперек них прибором. В работе [11] С. А. Торп указывает, что спроектированные для слежения за движением воды дрейфтеры могут не обеспечить надежное измерение скорости движения воды на поверхности моря. В работе [12] использовался автономный плавающий измеритель *Autosub*. Скорость диссипации турбулентной кинетической энергии измерялась установленным *CTD*-прибором. Полосы пузырьков, возникающие при циркуляции, идентифицируются методом, который заключается в поиске непрерывного фрагмента полосовой структуры, распознаваемой передними и боковыми гидролокаторами. Обрушающиеся волны, оставляющие облака пузырьков в воде, обнаруживаются передним гидролокатором *Autosub*, затем рассчитывается скорость диссипация.

При оценке турбулентных потоков необходимо не только знать пульсационные величины (температура, электропроводность, скорость течения),

---

<sup>1)</sup> Чухарев А. М. Вклад основных механизмов генерации турбулентности в вертикальный обмен в деятельном слое моря : дис. ... доктора физико-математических наук : 04.00.22. Севастополь, 2014. 274 с. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/dissertation/Chukharev\\_dissertation.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/dissertation/Chukharev_dissertation.pdf) (дата обращения: 11.03.2021).

но и точно определять положение измерительного устройства, так как измерения производятся в системе координат, связанной с прибором. Для этого в прибор устанавливают систему контроля положения, состоящую из набора инерциальных датчиков (акселерометр, гироскоп, магнитометр). После определения угловых скоростей, линейных ускорений и магнитного поля Земли, измеренные векторные величины (компоненты скорости течения) переводятся из локальной системы координат прибора в глобальную. Точность инерциальных датчиков, уровень шума и частота дискретизации в достаточной степени влияют на измеряемые гидрофизические характеристики. В частности, даже малые отклонения от ориентации датчика строго по осям или неточности определения главных осей волнового поля приводят к значительным искажениям измеряемых потоков, обусловленным поверхностными волнами.

Чтобы исследовать вертикальный турбулентный обмен, циркуляцию Ленгмюра и другие физические процессы в приповерхностном слое моря, на океанографической платформе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона Морского гидрофизического института (МГИ) используют измерительный комплекс «Сигма-1». Для повышения качества данных и уменьшения влияния собственных колебаний прибора на измеряемые гидрофизические характеристики разработана новая система контроля положения прибора на базе современного модуля *MPU-9250*. Для пересчета компонент скорости течения из локальной системы координат прибора в глобальную применяется метод *eddy correlation* [13].

#### Комплекс «Сигма-1»

Сотрудниками отделов турбулентности и гидрофизики шельфа МГИ для исследования турбулентных процессов в приповерхностном слое ранее был разработан измерительный комплекс «Сигма-1» [14]. Комплекс оснащен набором датчиков для регистрации основных гидрофизических параметров и их пульсационных величин: трех компонент пульсаций вектора скорости течения ( $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ ), температуры  $T$ , электропроводности воды  $S$  (включая пульсационные величины) и гидростатического давления  $P$ . Устройство и принцип работы электромагнитного датчика для измерения компонент скорости течения описаны в работе [15].

Измерительный комплекс «Сигма-1», имеющий два варианта конструкции, способен измерять флуктуации гидрофизических полей как в режиме зондирования, так и в позиционном режиме при работе с неподвижного основания (платформы). Общий вид позиционного варианта измерительного устройства приведен на рис. 1.



Рис. 1. Позиционный вариант комплекса «Сигма-1» и блок датчиков

Fig. 1. The positional version of SIGMA-1 complex and sensor unit

Таблица 1. Технические характеристики измерительного комплекса «Сигма-1»<sup>1)</sup>  
 Table 1. Technical characteristics of Sigma-1 measuring complex<sup>1)</sup>

Параметры / Parameters	Диапазон / Range	Разрешение / Resolution	Точность / Accuracy
Три компоненты вектора пульсаций скорости / Three components of velocity fluctuation vector	-2...+2 м/с / -2...+2 m/s	10 <sup>-3</sup> м/с / 10 <sup>-3</sup> m/s	±10 %
Температура / Temperature	0–30 °С	0.001 °С	±5 %
Электропроводность / Electrical conductivity	0–0.9 отн. ед. / 0–0.9 RU	2.5·10 <sup>-5</sup> отн. ед. / 2.5·10 <sup>-5</sup> RU	±5 %
Три компоненты линейных ускорений, м/с <sup>2</sup> / Three components of linear accelerations, m/s <sup>2</sup>	-20...+20	0.002	0.002
Крен и дифферент прибора, ° / Device roll and pitch, °	-20...+20	0.01	± 1
Угол азимута прибора, ° / Device azimuth angle, °	0–360	10	± 5
Давление / Pressure	0–1 МПа / 0–1 MPa	5·10 <sup>-4</sup> МПа / 5·10 <sup>-4</sup> MPa	± 1 %

Примечание: дискретность измерений по всем каналам 100 Гц.  
 Note: measurement resolution is 100 Hz for all channels.

Прибор в морской среде постоянно подвержен внешним воздействиям как при зондировании, так и в позиционном режиме измерений, в результате меняется его положение в пространстве, возникают колебания, что влияет на измерение пульсаций скорости. Поэтому прибор оснащен системой контроля положения его условной оси относительно магнитного меридиана (картушечный компас) и плоскости горизонта (крен и дифферент), а также датчиками линейного ускорения для определения собственных колебаний. Измерения при этом производятся в системе координат, связанной с прибором, поэтому векторные величины, такие как пульсации скорости в среде, рассчитываются с учетом движений прибора. В табл. 1 приведены основные технические характеристики измерительного комплекса «Сигма-1» и его системы определения положения.

#### **Исследование влияния собственных колебаний прибора на измеряемые гидрофизические характеристики**

Вблизи поверхности моря преобладает генерация турбулентности обрушениями волн. При обрушении волны, в зависимости от амплитуды, скорости волны и ряда других гидрометеорологических факторов, энергия может полностью диссипировать на глубине 2–3 м. Турбулентные вихри и возникающие пузырьковые облака, вследствие влияния когерентных структур

Ленгмюра, могут транспортироваться на глубину 6–10 м. Прибор размещался на глубинах от 1 до 10 м с последовательными остановками по 10 мин в 10 точках в диапазоне глубин от 0.2 до 10 м. При исследовании механизмов турбулентности было обнаружено, что изменение положения прибора может существенно влиять на исследуемые характеристики. Используя датчики линейных ускорений (*ADXL202E*) и компас, можно вычислить отклонение прибора от вертикали и изменение азимута. В табл. 2 приведены диапазоны колебаний прибора на разных глубинах, а также максимальное изменение углов его отклонения от вертикали за один отсчет по времени при частоте дискретизации 100 Гц.

Измеритель пульсаций вектора скорости течения в «Сигма-1» измеряет характеристики в системе координат прибора. Так как измеритель меняет свое положение, измерения пересчитываются в неподвижную систему координат. Компоненты пульсаций скорости течения пересчитываются в два этапа: 1) эти компоненты пересчитываются в неподвижную систему отсчета; 2) из пересчитанной скорости вычитается собственная скорость прибора.

Для пересчета компонент в неподвижную систему применяется метод Эйлера, предложенный С. Н. Благовещенским <sup>2)</sup>. Метод позволяет путем изменения величины углов придать измерительному устройству любое положение в пространстве. Система координат и устройство схематично изображены на рис. 2.

Таблица 2. Диапазоны вращения и максимальные изменения углов на глубине 1–10 м

Table 2. Rotation spectra and maximum angle changes at a depth of 1–10 m

Глубина, м / Depth, m	Диапазон изменения, ° / Change range of, °			Максимальное изменение за 10 мс, ° / Maximum change per 10 ms of, °		
	крена / roll	дифферента / pitch	азимута / azimuth	крена / roll	дифферента / pitch	азимута / azimuth
1	4.0	4.4	2.0	0.7	1.6	0.11
2	4.1	3.6	1.6	1.2	1.7	0.11
3	4.1	3.0	2.6	1.0	1.2	0.10
4	3.4	2.8	1.8	0.9	1.7	0.11
5	4.9	3.8	1.8	0.9	1.4	0.10
6	4.0	5.0	2.7	1.3	2.1	0.10
7	3.1	3.2	2.1	1.3	1.2	0.10
8	2.5	2.9	2.8	0.7	1.1	0.09
9	1.8	2.2	2.5	0.6	1.1	0.09
10	2.1	1.5	2.1	0.4	1.1	0.09

<sup>2)</sup> Справочник по теории корабля : В 3 т. / Под ред. Я. И. Войткунского. Л. : Судостроение, 1985. Т. 2. 440 с.

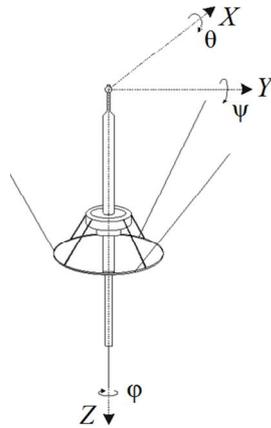


Рис. 2. Схематичное изображение измерительного комплекса «Сигма-1» и связанная с ним система координат  
 Fig. 2. Schematic representation of SIGMA-1 measuring complex and its associated coordinate system

Перевод в неподвижную систему отсчета производится с помощью матрицы преобразований  $\mathbf{T}$ :

$$\mathbf{U} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{U}'$$

где  $\vec{U}'$  – вектор скорости в координатах прибора;  $\vec{U}$  – в неподвижной системе координат;

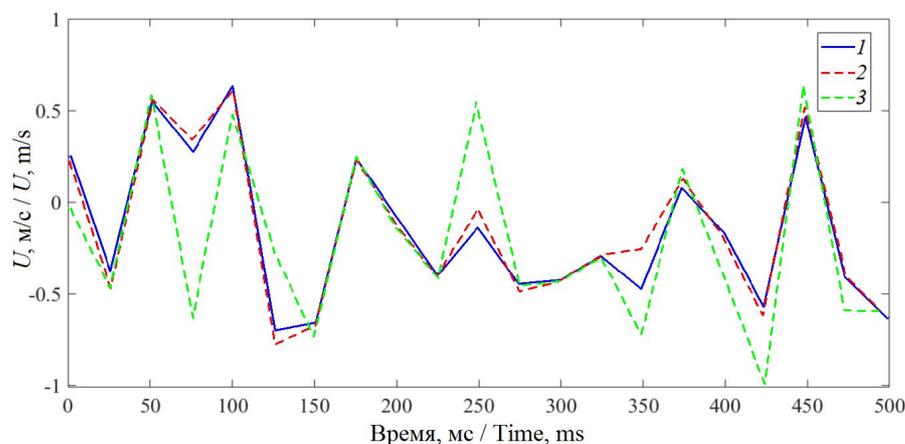
$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \varphi & \sin \theta \sin \psi \cos \varphi - \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \psi \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \psi \sin \varphi & \sin \theta \sin \psi \sin \varphi + \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \psi \cos \varphi - \sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \psi & \sin \theta \cos \psi & \cos \theta \cos \psi \end{pmatrix}$$

где  $\psi$  – угол поворота вокруг оси  $Y$ , или дифферент;  $\theta$  – угол поворота вокруг оси  $X$ , или крен;  $\varphi$  – угол поворота вокруг оси  $Z$ , или азимут.

В исследовании [16] при пересчете компонент пульсаций скорости в неподвижную систему координат было показано, что при отклонении измерительного комплекса от вертикали на 2–3° (крен и дифферент) значения пульсации скорости до и после пересчета заметно отличаются. Такие отклонения от вертикали чаще возникают в верхнем слое на глубинах 0.2–1 м, где ощутимо влияние поверхностных волн. Отсюда следует, что измерения углов необходимо проводить с точностью в пределах минимум 2°, так как отклонения более 2° влияют на измеренные компоненты скорости. Точность использовавшегося компаса в 5° также может заметно повлиять на измеренные турбулентные пульсации при пересчете. Компоненты скорости течения могут при этом существенно отличаться от реально измеренных и иметь другое направление (рис. 3).

Датчики линейного ускорения (два двухосевых акселерометра *ADXL202E*), установленные на комплексе «Сигма-1», позволяют посредством соответствующей обработки данных устранить влияние собственных движений прибора вдоль осей на измеренные пульсации скорости. Для этого применяется фильтрация исходных данных фильтром Винера [17]. В измерительном приборе отсутствует датчик угловых скоростей – трехосевой гироскоп. Оценить влияние вращений измерительного комплекса на измеряемые турбулентные характеристики без гироскопа не представляется возможным. Если прибор изменяет положение на 0.09–2.1° за 10 мс, то угловая скорость может быть 9–210 °/с. При пересчете компонент скорости течения такие колебания прибора могут существенно повлиять на измеряемые характеристики.

Вследствие недостаточной точности измерения азимута, углов наклона и отсутствия датчиков угловых ускорений невозможно должным образом применять метод *eddy correlation* [13] с целью выделения из общего сигнала пульсаций скорости среды с последующей линейной фильтрацией для получения корректных турбулентных пульсаций вертикальной и горизонтальных



Р и с . 3 . Влияние ошибки определения азимута на компоненту скорости  $U$ , пересчитанную по данным «идеального» компаса (1); при погрешности компаса  $1^\circ$  (2); при погрешности компаса  $5^\circ$  (3)

F i g . 3 . Influence of the azimuth determination error on the velocity component  $U$ , the latter being recalculated according to the “ideal” compass data (1), with a compass error of  $1^\circ$  (2), with a compass error of  $5^\circ$  (3)

скоростей. Метод *eddy correlation* является прямым методом определения вектора скорости течения. Суть метода заключается в измерении вектора скорости течения и вычитании из него векторов скоростей, которые регистрируются системой контроля положения при колебаниях прибора, для получения корректной скорости течения. Измеренный вектор скорости течения можно описать следующим образом [13]:

$$\vec{U} = \mathbf{T} \cdot \vec{U}_c + \mathbf{T} \cdot \int (\vec{a} + \vec{g}) dt + \vec{\Omega} \times \mathbf{T} \cdot L,$$

где  $\vec{U}_c$  – корректный вектор скорости течения;  $\mathbf{T}$  – матрица преобразования локальной системы координат прибора в глобальную систему координат;  $\vec{a}$  – вектор ускорения;  $\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения;  $\vec{\Omega}$  – вектор угловой скорости вращения комплекса «Сигма-1» относительно собственных осей координат  $X, Y, Z$ ;  $L$  – расстояние между датчиками системы контроля положения и датчиком определения компонент скорости течения.

Для применения предложенного метода учета угловых скоростей и устранения неточности компаса авторами разработана система контроля положения на базе модуля MPU-9250.

#### **Разработка системы контроля положения**

Система контроля положения должна представлять собой систему, состоящую из набора датчиков (трехосевые акселерометр, гироскоп и магнитометр) и микроконтроллера или другого устройства, обеспечивающего протокол обмена данными с ведущим микроконтроллером в «Сигме-1». Для учета всех колебаний прибора во время регистрации компонент скорости течения частота дискретизации должна быть не меньше 100 Гц. Точность измерения углов системой контроля положения по крену и дифференту должна

быть не хуже  $\pm 1^\circ$ ; точность измерения азимута не больше  $\pm 2^\circ$ . Трехосевой гироскоп должен иметь диапазон измерения угловой скорости не менее 300  $^\circ/\text{с}$ . Трехосевой акселерометр должен иметь диапазон измерения ускорения не менее  $\pm 2 g$ .

При обзоре готовых навигационных систем подходящих по заданным параметрам и доступных по стоимости найти не удалось. Большая часть систем<sup>3)</sup> имели частоту дискретизации меньшую, чем 100 Гц. К тому же системы в закрытых корпусах не соответствовали требуемым габаритам: модули с размерами более чем  $43 \times 43$  мм не поместились бы внутри корпуса «Сигма-1».

Для решения поставленной задачи был выбран модуль с датчиками MPU-9250<sup>4)</sup>. В корпусе MPU-9250 размещены трехосевой гироскоп, трехосевой акселерометр, а также магнитометр AK8963C (производства *Asahi Kasei Microdevices*), выполненные по технологии микроэлектронных механических систем (МЭМС). Данные с датчиков оцифровываются 16-битными АЦП, обрабатываются с применением алгоритмов *Motion Fusion* сигнальным процессором *DMP (Digital Motion Processor)* и передаются внешнему микроконтроллеру по шине *I2C/SPI*. Характеристики микросхемы MPU-9250: рабочие диапазоны гироскопа  $\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$   $^\circ/\text{с}$ ; рабочие диапазоны акселерометра  $\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16 g$ ; рабочий диапазон магнитометра<sup>5)</sup>  $\pm 4800$  мкТл; напряжение питания 3.3–5 В. Размеры платы  $27 \times 16 \times 1.5$  мм.

В качестве микроконтроллера был выбран модуль *Arduino Nano*. Модуль содержит микроконтроллер *ATmega328* и схему питания для внешних подключаемых устройств на 3.3 и 5 В. Оснащение интерфейсами *I2C, USART*, а также двумя 8-разрядными и одним 16-разрядным таймерами позволяет разрабатывать надежные и гибкие протоколы обмена данными. Платформа *Arduino* имеет собственную среду разработки *Arduino IDE* со встроенными библиотеками, что существенно облегчает разработку простых и надежных систем. Схема подключения системы контроля положения к ведущему микроконтроллеру приведена на рис. 4. *Arduino Nano 328* подключается к MPU-9250 через интерфейс *I2C*. Связь между ведущим контроллером комплекса «Сигма-1» *ATmega16* и ведомым контроллером системы контроля положения

---

<sup>3)</sup> URL: <https://www.compel.ru/infosheet/PNI/12810%20TCM-XB> (дата обращения: 15.03.2021) ; URL: [https://avi-solutions.com/catalog/inertsialnye\\_datchiki/kompasy/dcm250b\\_485/](https://avi-solutions.com/catalog/inertsialnye_datchiki/kompasy/dcm250b_485/) (дата обращения: 15.03.2021) ; URL: [https://avi-solutions.com/catalog/inertsialnye\\_datchiki/kompasy/dcm260b\\_232/](https://avi-solutions.com/catalog/inertsialnye_datchiki/kompasy/dcm260b_232/) (дата обращения: 15.03.2021) ; URL: [https://rion.en.alibaba.com/product/1827136956209959541/DCM301B\\_High\\_Precision\\_Digital\\_Compass\\_Module\\_With\\_Heading\\_360deg\\_Output\\_RS232\\_RS485\\_TTL\\_Optional.html](https://rion.en.alibaba.com/product/1827136956209959541/DCM301B_High_Precision_Digital_Compass_Module_With_Heading_360deg_Output_RS232_RS485_TTL_Optional.html) (дата обращения: 15.03.2021) ; URL: [https://www.alibaba.com/product-detail/DCM302B-magnetic-heading-angle-3D-digital\\_60479448309.html](https://www.alibaba.com/product-detail/DCM302B-magnetic-heading-angle-3D-digital_60479448309.html) (дата обращения: 15.03.2021) ; URL: <https://aliexpress.ru/i/32810731069.html> (дата обращения: 15.03.2021) ; URL: <https://www.digikey.com/catalog/en/partgroup/foxos8700cq/38337#:~:text=FXOS8700CQ%20is%20a%20small%2C%20low,along%20with%20smart%2Dembedded%20functions> (дата обращения: 15.03.2021) ; URL: <https://www.digikey.sg/product-detail/en/honeywell-aerospace/HMR3500/342-1058-ND/1692482> (дата обращения: 15.03.2021).

<sup>4)</sup> URL: <https://www.compel.ru/infosheet/INSENSE/MPU-9250> (дата обращения: 15.03.2021).

<sup>5)</sup> URL: <https://www.mouser.fr/datasheet/2/400/PS-MPU-9250A-01-v1.1-1313803.pdf> (дата обращения: 15.03.2021).

*Arduino Nano 328* обеспечивается через интерфейс *USART* через преобразователи *TTL-RS485*.

Для разработки системы контроля положения необходимо настроить и откалибровать каждый датчик для условий, в которых они будут эксплуатироваться. Условно систему можно разбить на два устройства: инклинометр и компас.

Акселерометр представляет собой датчик, регистрирующий линейные ускорения вдоль трех осей. Регистрируется вектор ускорения свободного падения  $\vec{g}$  ( $9.8 \text{ м/с}^2$ ), при отклонении от вертикали проекция вектора на оси *MPU-9250* изменяется. Ориентируясь на вектор ускорения, углы крена и дифферента вычисляем следующим образом:

1) по трем проекциям на оси *MPU-9250* вычисляется трехмерный вектор ускорения свободного падения:

$$\vec{g} = \sqrt{G_y^2 + G_x^2 + G_z^2},$$

где  $G_y, G_x, G_z$  – проекции на оси  $X, Y, Z_T$  соответственно;

2) с использованием свойств прямоугольного треугольника вычисляется угол  $b$  (рис. 5) между вектором  $G$  и проекцией  $G_y$  на ось  $Y$ :

$$b = \arccos(G_y / G);$$

3) угол крена  $a$  – отклонения  $G_y$  от оси  $Y$  – рассчитывается по формуле  $a = 90^\circ - b$ . Аналогичным образом вычисляется угол дифферента по оси  $X$  с проекцией  $G_x$ .

Однако при движении акселерометр регистрирует также любые ускорения вдоль осей, что при постоянном движении будет давать неверный результат положения системы, причем на всех трех каналах акселерометра регистрируют высокочастотный шум, который необходимо отфильтровывать.

Для определения углов рыскания, а также для корректировки акселерометра используется гироскоп. Гироскоп представляет собой трехосевой

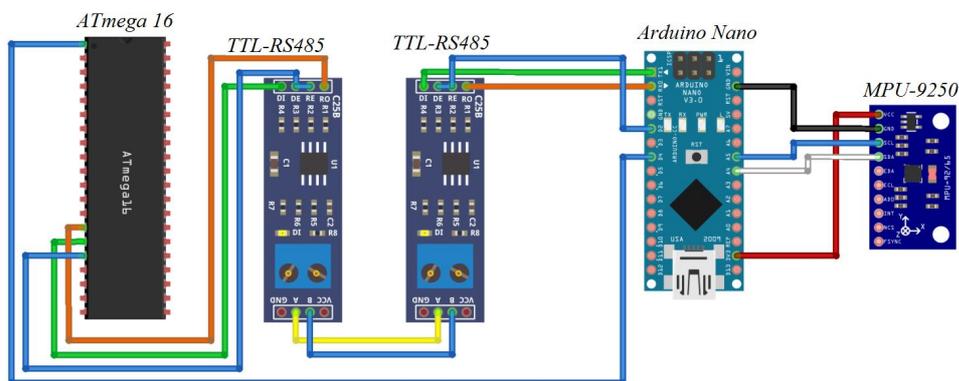
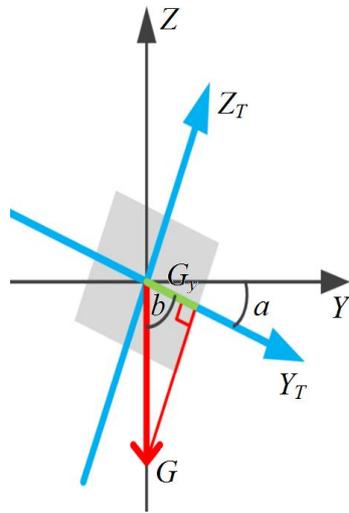


Рис. 4. Схема подключения системы контроля положения к ведущему микроконтроллеру комплекса «Сигма-1»

Fig. 4. Connection diagram of the position control system to the SIGMA-1 master microcontroller



Р и с . 5. Изменение угла крена при вращении датчика ( $a$  – угол наклона тела;  $b$  – угол отклонения тела от оси  $Z$ ;  $G$  – вектор ускорения свободного падения;  $G_y$  – проекция на ось тела  $Y_T$ )

F i g . 5. Change of the roll angle as the sensor rotates ( $a$  – tilt angle,  $b$  – off  $Z$ -axis angle,  $G$  – gravity vector,  $G_y$  – projection on body axis  $Y_T$ )

датчик угловой скорости. При интегрировании угловой скорости по крену, дифференцированию можно вычислить положения осей датчика. Следует отметить, что на гироскоп действует эффект смещения нуля, то есть при отсутствии угловой скорости показания гироскопа могут отличаться от нулевого значения.

При интегрировании соответственно накапливается ошибка. Для решения вышеперечисленных проблем, был использован цифровой альфа-бета-фильтр <sup>6)</sup> (комплементарный фильтр):

$$a(t) = (1 - K) \cdot (a(t - dt) + gr_x \cdot dt) + K \cdot ac_{angle},$$

где  $a(t)$  – искомый угол наклона, учитывающий показания акселерометра;  $a(t - dt)$  – угол тела в предыдущий момент времени;  $gr_x$  – скорость вращения тела вокруг оси  $X$ ;  $dt$  – время, которое прошло с момента предыдущего вычисления угла  $a$ ;  $ac_{angle}$  – значение угла наклона, полученное при помощи акселерометра;  $K$  – коэффициент фильтра.

Альфа-бета-фильтр предназначен для фильтрации данных гироскопа и акселерометра путем их умножения на эмпирически подобранный коэффициент  $K$ . В результате фильтрации вышеперечисленные недостатки датчиков не влияют на вычисления углов и погрешность будет незначительной.

Для вычисления азимута используется магнитометр *AK8963C*. Устройство измеряет проекцию вектора индукции магнитного поля на оси чувствительности. Перед вычислением азимута необходимо выполнить калибровку магнитометра для учета влияния эффектов *hard iron* и *soft iron*. Металлические конструкции и электромагнитные поля в зондирующем приборе будут искажать форму измеряемого магнитного поля, тем самым напрямую влияя на конечный результат определения азимута. В результате калибровки должны быть получены величина смещения для учета влияния эффекта *hard iron* и матрица трансформации для учета влияния эффекта *soft iron*. Корректировка данных будет выглядеть следующим образом:

$$M_c = M \times (M_{nc} - B),$$

где  $M_c$  – скорректированная калибровкой проекция магнитного поля на оси чувствительности  $X, Y, Z$ ;  $M$  – матрица трансформации для коррекции формы магнитного поля;  $M_{nc}$  – нескорректированная калибровкой проекция магнитного поля;  $B$  – величина смещения проекции магнитного поля.

<sup>6)</sup> URL: <https://robotclass.ru/articles/complementary-filter/> (дата обращения: 15.03.2021).

Стоит отметить, что оси чувствительности  $X$  и  $Y$  в  $MPU-9250$  и  $AK8963C$  имеют разные направления <sup>7)</sup>, поэтому перед вычислением азимута необходимо выполнить переобозначение для осей  $AK8963C$ :

$$M_{\psi} = -\theta_f,$$

$$M_{\theta} = \psi_f,$$

где  $\theta_f$  – угол крена и  $\psi_f$  – угол дифферента, рассчитанные по значениям акселерометра и гироскопа в альфа-бета-фильтре.

После корректировки данных необходимо выполнить поправку проекции магнитного поля по крену и дифференту:

$$M_{crx} = M_{cx} \cdot \cos(M_{\psi}) + M_{cy} \cdot \sin(M_{\theta}) \cdot \sin(M_{\psi}) - M_{cz} \cdot \cos(M_{\theta}) \cdot \sin(M_{\psi}), \quad (1)$$

$$M_{cry} = M_{cy} \cdot \cos(M_{\theta}) + M_{cz} \cdot \sin(M_{\theta}), \quad (2)$$

где  $M_{crx}$  и  $M_{cry}$  – скорректированные по крену и дифференту проекции вектора магнитного поля на оси чувствительности датчика;  $M_{cx}$  и  $M_{cy}$  – проекция магнитного поля на оси  $X$  и  $Y$ ;  $M_{\theta}$  и  $M_{\psi}$  – значения углов крена и дифферента  $MPU-9250$ , скорректированные для осей магнитометра  $AK8963C$ .

Скорректированные значения также необходимо отфильтровать через альфа-бета-фильтр, так как измеренные значения магнитометра имеют высокочастотный шум:

$$M_x = (1 - K) \cdot M_{crx} + K \cdot M_x,$$

$$M_y = (1 - K) \cdot M_{cry} + K \cdot M_y,$$

где  $M_x$  и  $M_y$  – отфильтрованные проекции вектора;  $K$  – коэффициент фильтра;  $M_{crx}$  и  $M_{cry}$  – скорректированные проекции вектора магнитного поля по крену и дифференту.

Для расчета азимута полученные значения необходимо пересчитать в плоскость по формуле

$$A = \operatorname{arctg}\left(\frac{M_x}{M_y}\right),$$

где  $\operatorname{arctg}$  – функция полного арктангенса;  $M_x$  и  $M_y$  – отфильтрованные проекции вектора по осям  $X$ ,  $Y$ .

В среде программирования *Arduino IDE* была написана программа расчета углов дифферента, крена и азимута. Программа инициализации и калибровки  $MPU-9250$  была взята из электронных ресурсов <sup>8)</sup>. Для калибровки

<sup>7)</sup> URL: <https://datasheetspdf.com/datasheet/AK8963.html> (дата обращения: 15.03.2021).

<sup>8)</sup> URL: <https://github.com/kriswiner/MPU9250> (дата обращения: 15.03.2021).

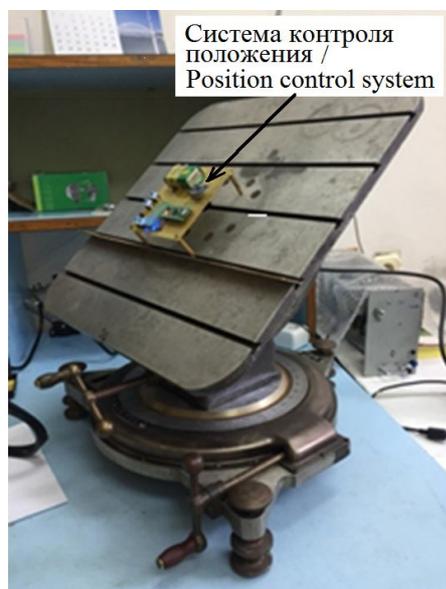


Рис. 6. Испытания модуля на трехосной поворотной установке

Fig. 6. Tests of the module on a three-axis rotary unit

магнитометра были рассмотрены программы *Tilt-Compensated-Compass*<sup>9)</sup> и *Magneto*<sup>10)</sup>. *Magneto* показала лучшие результаты.

Испытания системы контроля положения проводились на трехосной поворотной установке с погрешностью 0.1° (рис. 6). Определение азимута проверялось на установке в диапазоне от 330 до 0° (рис. 7, *a*) и от 0 до 30° (рис. 7, *b*). Максимальная погрешность в первом диапазоне составляет 2.09°, во втором 0.84°.

Изменения углов дифферента и крена проводились в диапазоне от +30 до -30° с шагом в 1°. Возникающая нелинейная погрешность по дифференту составляет максимум 0.27 и 0.31° в положительном (рис. 8, *a*) и отрицательном (рис. 8, *b*) направлениях. Максимальная погрешность по крену составляет

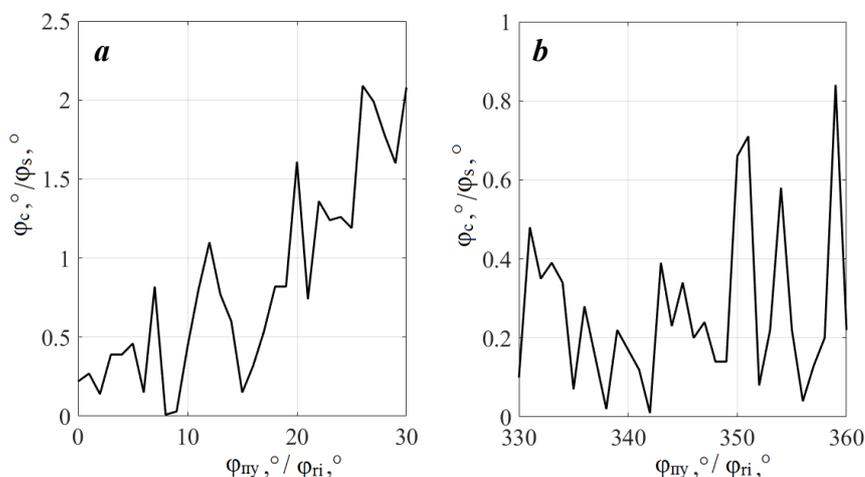
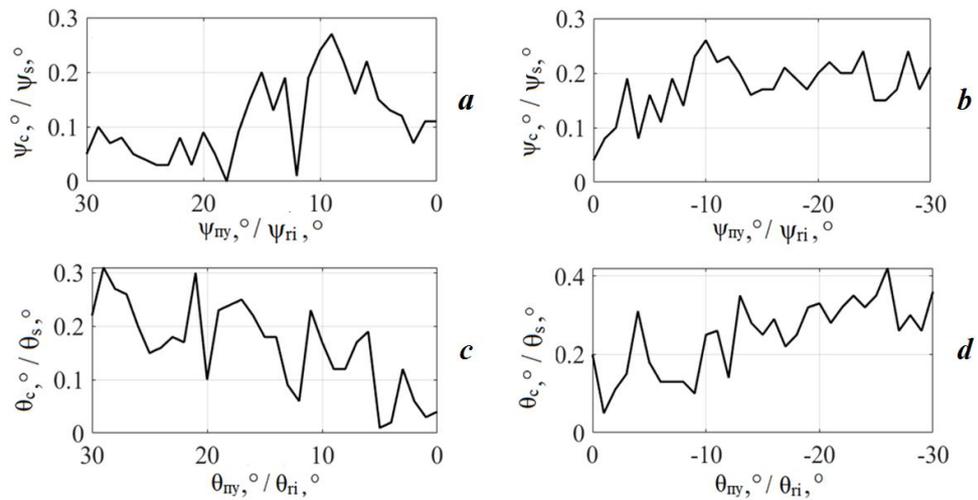


Рис. 7. Зависимость погрешностей углов азимута, измеренных системой контроля положения  $\varphi_c$ , от углов азимута поворотной установки  $\varphi_{пу}$ : *a* – в диапазоне 0–30°; *b* – диапазоне 330–360°

Fig. 7. Dependence of inaccuracy of the azimuth angles measured by the position monitoring system  $\varphi_c$  on azimuth angles of the rotary installation  $\varphi_{пу}$ : *a* – within the range of 0–30°; *b* – within the range of 330–360°

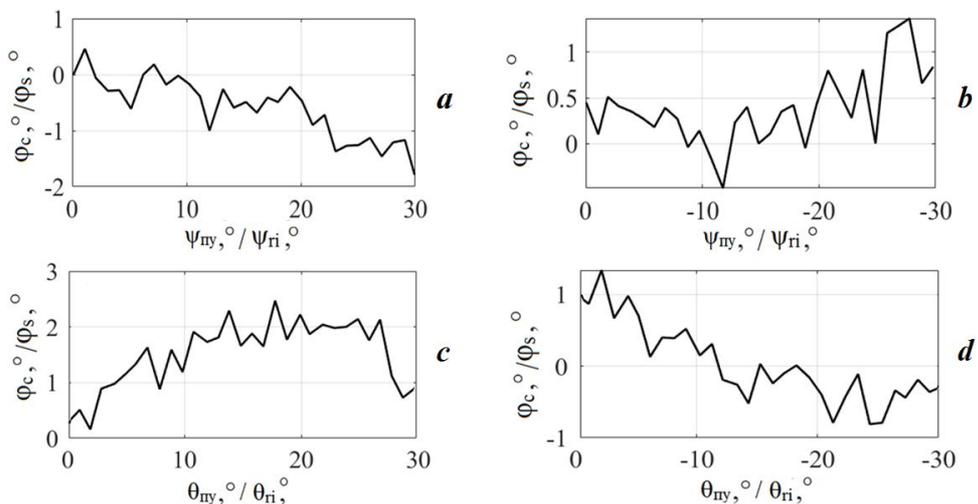
<sup>9)</sup> URL: <https://www.instructables.com/Tilt-Compensated-Compass/> (дата обращения: 15.03.2021).

<sup>10)</sup> URL: <https://robotclass.ru/articles/magnetometer-and-compass/> (дата обращения: 15.03.2021).



Р и с. 8. Зависимость погрешностей углов дифферента  $\psi_c$  (a, b) и крена  $\theta_c$  (c, d), измеренных системой контроля положения, от углов дифферента  $\psi_{ny}$  и углов крена  $\theta_{ny}$  поворотной установки: a, c – в диапазоне 0–30°; b, d – в диапазоне 330–360°

Fig. 8. Dependence of the inaccuracy of the pitch  $\psi_s$  (a, b) and roll  $\theta_s$  angles (c, d) measured by the position monitoring system on pitch  $\psi_{ri}$  and roll  $\theta_{ri}$  angles of the rotary installation: a, c – within the range of 0–30°; b, d – within the range of 330–360°



Р и с. 9. Зависимость смещения углов азимута  $\varphi_c$ , измеренных системой контроля положения, от углов дифферента  $\psi_{ny}$  (a, b) и крена  $\theta_{ny}$  (c, d) поворотной установки: a, c – в диапазоне 0–30°; b, d – в диапазоне 330–360°

Fig. 9. Dependence of the azimuth angles  $\varphi_s$  drift measured by the position monitoring system on the pitch  $\psi_{ri}$  and roll  $\theta_{ri}$  angles of the rotary installation: a, c – within the range of 0–30°; b, d – within the range of 330–360°

0.42 и 0.31° в положительном (рис. 8, *c*) и отрицательном (рис. 8, *d*) направлениях. При изменении углов дифферента в положительном направлении скорректированные значения азимута, найденные по формулам (1), (2), смещались максимум на 1.49° (рис. 9, *a*), в отрицательном направлении – на 1.37° (рис. 9, *b*); при изменении углов крена в положительном направлении – максимум на 2.47° (рис. 9, *c*); в отрицательном направлении – на 1.34° (рис. 9, *d*).

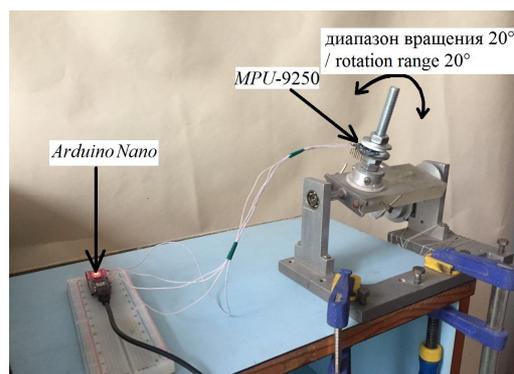


Рис. 10. Испытания на установке, имитирующей колебания

Fig. 10. Tests on an installation simulating vibrations

Для проверки гироскопа в MPU-9250 использовалась имитирующая колебания установка, разработанная сотрудниками отдела турбулентности МГИ (рис. 10). Установка совершает колебательные движения в диапазоне 20° вокруг одной оси с угловыми скоростями 118, 36 и 15 °/с. Эмпирически установлено, что погрешность гироскопа при колебаниях относительно осей чувствительности меняется в зависимости от угловой скорости (табл. 3).

При эмпирически подобранном коэффициенте для альфа-бета-фильтра отфильтрованное значение угла дифферента имеет шум в диапазоне 0–0.14 °/с, значение угла крена – шум в диапазоне 0–0.02 °/с, значение угла азимута – шум в диапазоне 0–0.34 °/с.

### Заключение

Взаимодействие механизмов обрушения волн и циркуляции Ленгмюра, влияние этих механизмов на интенсивность турбулентности и вертикальный обмен изучены далеко не полностью. Для понимания сложных турбулентных процессов в океане и для объективных оценок эволюции гидрофизических полей необходимо совершенствовать контактные методы исследования. В настоящей работе показано, что измерительные приборы типа «Сигма-1» перемещаются не только у поверхности, где ощутимо влияние обрушения волн, но и на глубине 8–10 м, на которой происходит заглупление

Таблица 3. Технические характеристики системы контроля положения

Table 3. Technical characteristics of the position monitoring system

Угловая скорость стенда, °/с / Testing unit angular velocity, °/s	Угловая скорость по гироскопу MPU-9250, °/с / Angular velocity according to MPU-9250 gyroscope, °/s	Погрешность, °/с / Inaccuracy, °/s
118	130	12
36	37	1
15	16	1

и перенос турбулентных вихрей циркуляциями Ленгмюра и течениями. Собственные колебания прибора при этом заметно влияют на измерения компонент скорости течения. Система, определяющая перемещения измерителя, должна иметь достаточно высокую частоту дискретизации, не менее 100 Гц, точность определения углов не больше  $1^\circ$  и должна быть оснащена датчиками угловых и линейных ускорений для определения колебаний любого характера.

На сегодняшний день имеется достаточно информации и средств для разработки такой системы, однако подбор методов калибровки, расчета углов и фильтрации сигнала от собственного шума датчика является непростой задачей. Для разработки компактной системы контроля положения прибора был выбран модуль *MPU-9250*. На основании теории расчета углов подобран подходящий фильтр альфа-бета, сочетающий простоту и эффективность. Программа расчета углов была написана в среде программирования *Arduino IDE*. Калибровку магнитометра необходимо выполнять непосредственно в условиях эксплуатации, поэтому был выбран наиболее точный и удобный метод калибровки в программе *Magneto*. После испытания системы и подбора коэффициента фильтрации удалось достичь заданных характеристик: в диапазоне от  $+30$  до  $-30^\circ$  погрешность по дифференту составляет максимум 0.27 и  $0.31^\circ$  в положительном и отрицательном направлениях; максимальная погрешность по крену составляет 0.42 и  $0.31^\circ$  в положительном и отрицательном направлениях; в диапазоне от  $330$  до  $30^\circ$  погрешность изменяется от 0.84 до  $2.09^\circ$ ; при собственных колебаниях угловые скорости в пределах 15–118  $^\circ/\text{с}$  регистрируются гироскопом с погрешностью в диапазоне 1–12  $^\circ/\text{с}$ . Испытания показали, что система контроля положения достаточно сильно подвержена влиянию собственных шумов, при этом альфа-бета-фильтр недостаточно хорошо «срезает» высокочастотный собственный шум магнитометра *AK8963C*. Для решения этой задачи необходимо глубже изучить проблемы фильтрации сигнала с МЭМС.

При установке комплекса «Сигма-1» на океанологической платформе его калибруют путем вращения вокруг собственных осей, затем ось *X* ориентируют на север. В диапазоне  $330-30^\circ$  точность датчика приемлема (погрешность 0.84– $2.09^\circ$ ), однако в других секторах измеряемой окружности погрешность может достигать до  $11^\circ$ . Такая нелинейная погрешность связана с влиянием эффектов *hard iron* и *soft iron*, особенностями магнитного поля Земли и конструкцией датчика. При этом соответствующая установка измерительного комплекса и правильная калибровка компаса позволяют свести к минимуму указанные погрешности. В дальнейшем при установке системы контроля положения в комплекс «Сигма-1» будет написан протокол связи между контроллерами и проведены испытания системы в реальных условиях. Благодаря проведенной модернизации комплекса можно существенно улучшить качество получаемой информации и более качественно исследовать процессы турбулентного обмена в приповерхностном слое моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Монин А. С., Озмидов Р. В.* Океанская турбулентность. Л. : Гидрометеиздат, 1981. 320 с.
2. Apparatus for atmospheric surface layer measurements over waves / M. A. Donelan [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1999. Vol. 16, iss. 9. P. 1172–1182. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<1172:AFASLM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<1172:AFASLM>2.0.CO;2)
3. Oceanic turbulence dissipation measurements in SWADE / W. M. Drennan [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. Vol. 26, iss. 5. P. 808–815. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<0808:OTDMIS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0808:OTDMIS>2.0.CO;2)
4. *Donelan M. A., Drennan W. M., Katsaros K. B.* The air–sea momentum flux in conditions of wind sea and swell // *Journal of Physical Oceanography*. 1997. Vol. 27, iss. 10. P. 2087–2099. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<2087:TASMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<2087:TASMF>2.0.CO;2)
5. *Gemmrich J. R., Farmer D. M.* Near-surface turbulence and thermal structure in a wind-driven sea // *Journal of Physical Oceanography*. 1999. Vol. 29, iss. 3. P. 480–499. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<0480:NSTATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<0480:NSTATS>2.0.CO;2)
6. *Gemmrich J. R., Farmer D. M.* Observations of the scale and occurrence of breaking surface waves // *Journal of Physical Oceanography*. 1999. Vol. 29, iss. 10. P. 2595–2606. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2595:OOTSAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2595:OOTSAO>2.0.CO;2)
7. *Gemmrich J. R., Farmer D. M.* Near-surface turbulence in the presence of breaking waves // *Journal of Physical Oceanography*. 2004. Vol. 34, iss. 5. P. 1067–1086. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034<1067:NTITPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034<1067:NTITPO>2.0.CO;2)
8. Three-Dimensional Flow in the Upper Ocean / R. A. Weller [et al.] // *Science*. 1985. Vol. 227, iss. 4694. P. 1552–1556. doi:10.1126/science.227.4694.1552
9. *Weller R. A., Price J. F.* Langmuir circulation within the oceanic mixed layer // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1988. Vol. 35, iss. 5. P. 711–747. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90027-1)
10. *Zedel L., Farmer D.* Organised structures in subsurface bubble clouds: Langmuir circulation in the open ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1991. Vol. 96, iss. C5. P. 8889–8900. doi:10.1029/91JC00189
11. *Thorpe S. A.* Langmuir circulation // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2004. Vol. 36. P. 55–79. doi:10.1146/annurev.fluid.36.052203.071431
12. Measurements of turbulence in the upper-ocean mixing layer using autosub / S. A. Thorpe [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. Vol. 33, iss. 1. P. 122–145. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<0122:MOTITU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0122:MOTITU>2.0.CO;2)
13. Eddy-Correlation Measurements of Air-Sea Fluxes from a Discus Buoy / F. Ancil [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1994. Vol. 11, iss. 4. P. 1144–1150. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<1144:ECMOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<1144:ECMOAS>2.0.CO;2)
14. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря / А. С. Самодуров [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 5. С. 60–71.
15. *Дыкман В. З., Ефремов О. И.* Электромагнитный датчик для измерения флуктуаций вектора скорости течения // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : МГИ, 2000. С. 318–324.
16. *Чухарев А. М.* Применение измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования турбулентности на океанографической платформе // *Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря*. Севастополь : МГИ, 2010. Вып. 21. С. 231–238.

17. Farhang-Boroujeni B. Adaptive filters: theory and applications. New York : John Wiley & Sons, 1999. 548 p.

Об авторах:

**Павлов Михаил Игоревич**, аспирант, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-9998-2080**, *mikhail.pavlov.1993@mail.ru*

**Чухарев Александр Михайлович**, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1078-6425**, *alexchukh@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

**Павлов Михаил Игоревич** – основная идея, написание статьи

**Чухарев Александр Михайлович** – консультации при подготовке и написании статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### REFERENCES

1. Monin, A.S. and Ozmidov, R.V., 1985. *Turbulence in the Ocean*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 246 p.
2. Donelan, M.A., Madsen, N., Kahma, K.K. and Tsanis, I.K., 1999. Apparatus for Atmospheric Surface Layer Measurements over Waves. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(9), pp. 1172-1182. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<1172:AFASLM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<1172:AFASLM>2.0.CO;2)
3. Drennan, W.M., Donelan, M.A., Terray, E.A. and Katsaros, K.B., 1996. Oceanic Turbulence Dissipation Measurements in SWADE. *Journal of Physical Oceanography*, 26(5), pp. 808-815. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<0808:OTDMIS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0808:OTDMIS>2.0.CO;2)
4. Donelan, M.A., Drennan, W.M. and Katsaros, K.B., 1997. The Air-Sea Momentum Flux in Conditions of Wind Sea and Swell. *Journal of Physical Oceanography*, 27(10), pp. 2087-2099. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<2087:TASMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<2087:TASMF>2.0.CO;2)
5. Gemmrich, J.R. and Farmer, D.M., 1999. Near-Surface Turbulence and Thermal Structure in a Wind-Driven Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 29(3), pp. 480-499. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<0480:NSTATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<0480:NSTATS>2.0.CO;2)
6. Gemmrich, J.R. and Farmer, D.M., 1999. Observations of the Scale and Occurrence of Breaking Surface Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 29(10), pp. 2595-2606. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2595:OOTSAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2595:OOTSAO>2.0.CO;2)
7. Gemmrich, J.R. and Farmer, D.M., 2004. Near-Surface Turbulence in the Presence of Breaking Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 34(5), pp. 1067-1086. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034<1067:NTITPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034<1067:NTITPO>2.0.CO;2)
8. Weller, R.A., Dean, J.P., Price, J.F., Francis, E.A., Marra, J. and Broadman, D.C., 1985. Three-Dimensional Flow in the Upper Ocean. *Science*, 227(4694), pp. 1552-1556. doi:10.1126/science.227.4694.1552
9. Weller, R.A. and Price, J.F., 1988. Langmuir Circulation within the Oceanic Mixed Layer. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 35(5), pp. 711-747. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90027-1)
10. Zedel, L. and Farmer, D., 1991. Organised Structures in Subsurface Bubble Clouds: Langmuir Circulation in the Open Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C5), pp. 8889-8900. doi:10.1029/91JC00189

11. Thorpe, S.A., 2004. Langmuir Circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, pp. 55–79. doi:10.1146/annurev.fluid.36.052203.071431
12. Thorpe, S.A., Osborn, T.R., Jackson, J.F.E., Hall, A.J. and Lueck, R.G., 2003. Measurements of Turbulence in the Upper-Ocean Mixing Layer Using Autosub. *Journal of Physical Oceanography*, 33(1), pp. 122–145. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<0122:MOTITU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0122:MOTITU>2.0.CO;2)
13. Anctil, F., Donelan, M.A., Drennan, W.M. and Graber, H.C., 1994. Eddy-Correlation Measurements of Air-Sea Fluxes from a Discus Buoy. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(4), pp. 1144–1150. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<1144:ECMOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<1144:ECMOAS>2.0.CO;2)
14. Samodurov, A.S., Dykman, V.Z., Barabash, V.A., Efremov, O.I., Zubov, A.G., Pavlenko, O.I. and Chukharev, A.M., 2005. “Sigma-1” Measuring Complex for the Investigation of Small-Scale Characteristics of Hydrophysical Fields in the Upper Layer of the Sea. *Physical Oceanography*, 15(5), pp. 311–322. <https://doi.org/10.1007/s11110-006-0005-1>
15. Dykman, V.Z. and Efremov, O.I., 2000. [Electromagnetic Sensor for Measurement of the Current Velocity Vector Fluctuations]. In: MHI, 2000. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, pp. 318–324 (in Russian).
16. Chukharev, A.M., 2010. Field Measurements of Turbulent Kinetic Energy Dissipation in Sea Surface Layer. In: MHI, 2010. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 21, pp. 231–238 (in Russian).
17. Farhang-Boroujeny, B., 1999. *Adaptive Filters: Theory and Applications*. New York: John Wiley & Sons, 548 p.

*About the authors:*

**Mikhail I. Pavlov**, postgraduate student, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-9998-2080**, [mixail.pavlov.1993@mail.ru](mailto:mixail.pavlov.1993@mail.ru)

**Aleksandr M. Chukharev**, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0003-1078-6425**, [alexchukh@mail.ru](mailto:alexchukh@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

**Mikhail I. Pavlov** – general concept, article writing

**Aleksandr M. Chukharev** – consultations on the article preparation and writing

*All the authors have read and approved the final manuscript.*