

**ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ  
ПРИ ПОМОЩИ СОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ**

**Столяров Л.С.**, инженер,  
ORCID: 0000-0002-8751-1983

**Чернецкий А.В.**, инженер,  
Chern.od@gmail.com

*Одесский национальный морской университет,*

**Синица Р.В.**, инженер,  
Sinitsa\_roma@ukr.net

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу измерения параметров волн в лабораторных экспериментальных исследованиях при помощи современной высокоточной измерительной аппаратуры. Волны в бассейне формируются при помощи щитового волнопродуктора, воздействию которых подвергаются новые конструкции морских судов, с целью определения оптимальных параметров обвода корпусов, а также при исследовании вопросов воздействия волн на физические модели ограждающих и берегозащитных гидротехнических сооружений.

Описанная в публикации измерительная аппаратура основана на датчиках емкостного типа, преобразующих линейную величину колебаний уровня свободной поверхности воды в величину электрической емкости конденсатора. Измерительная система позволяет получать высококачественные результаты проводимых экспериментальных исследований, с точностью измерений равной 0,1 мм.

**Ключевые слова:** гидроволновой бассейн, экспериментальная аппаратура, физическое моделирование, аналогово-цифровой преобразователь.

**Введение.** Строительство новых типов морских судов, а также конструкций ограждающих и берегозащитных гидротехнических сооружений требуют проведения тщательных первоначальных экспериментальных исследований, проводимых на физических моделях в специализированных гидроволновых лабораториях, которые позволяют избавиться от рисков финансовых потерь при неверном выборе типов и элементов проектируемых объектов. Данные исследования дают возможность оценивать с высокой степенью точности в масштабных условиях физику протекающих процессов, которые будут наблюдаться во время эксплуатации на реальных объектах и сооружениях. Физику процесса гидродинамического воздействия зачастую достаточно сложно описать при помощи лишь математической модели, что подтверждает высокую степень важности проведения экспериментального моделирования.

Прогресс технической науки в большой степени зависит от возможности проведения более точных измерений. Именно поэтому значительная часть волновых исследований в последние годы была направлена на создание новых измерительных приборов и совершенствование методов измерения, понимание того как именно и для чего производятся измерения.

В данной работе описана методика измерения волн в экспериментальных лабораторных исследованиях при помощи современной, высокоточной измерительной аппаратуры в гидроволновых экспериментальных исследованиях, а также принцип ее работы.

**Целью работы** являлось определения параметров волн в лабораторных условиях гидроволнового бассейна современной высокоточной измерительной аппаратурой, в результате проведения масштабных экспериментальных исследований. Данные исследования, связаны с вопросами волнового воздействия на модели берегозащитных и ограждающих гидротехнических сооружений, а также используются при проектировании корпусов новых конструкций морских судов.

На кафедрах «Теории и проектирования корабля» им. профессора Ю.Л. Воробьева ОНМУ

и «Гидротехнического строительства» ОГАСА, была поставлена задача, повысить точность измерений волновых параметров в экспериментальных исследованиях, которые бы отвечали современным требованиям.

Задача создания современной высокоточной измерительной аппаратуры заключалась в обеспечении возможности проведения экспериментальных исследований с необходимой степенью точности, которые бы позволили получить достоверные, результаты проводимых экспериментальных исследований, при которых точность измерений составляла 0,1 мм.

**Методы исследования.** Для работы над поставленной целью была создана специализированная рабочая группа, в состав которой вошли специалисты ОНМУ и ОГАСА, во главе с заведующим гидроволновой лабораторией кафедры теории корабля Столяровым Л.С. Рабочая группа пришла к выводу, что имеющийся измерительный комплекс не дает возможности в полной мере дать ответ на поставленные вопросы. В связи с чем, было принято решение использовать современные радиомикроэлектронные технологии, которые были положены в основу создания новых датчиков, описанных в данной статье.

**Результаты исследований.** Измерительный датчик используется при проведении экспериментально-исследовательских работах, которые проводятся в специализированном бассейне гидроволновой лаборатории, и включает в себя 6 основных узлов (блоков). Схема устройства измерительного датчика представлена на рис. 1.

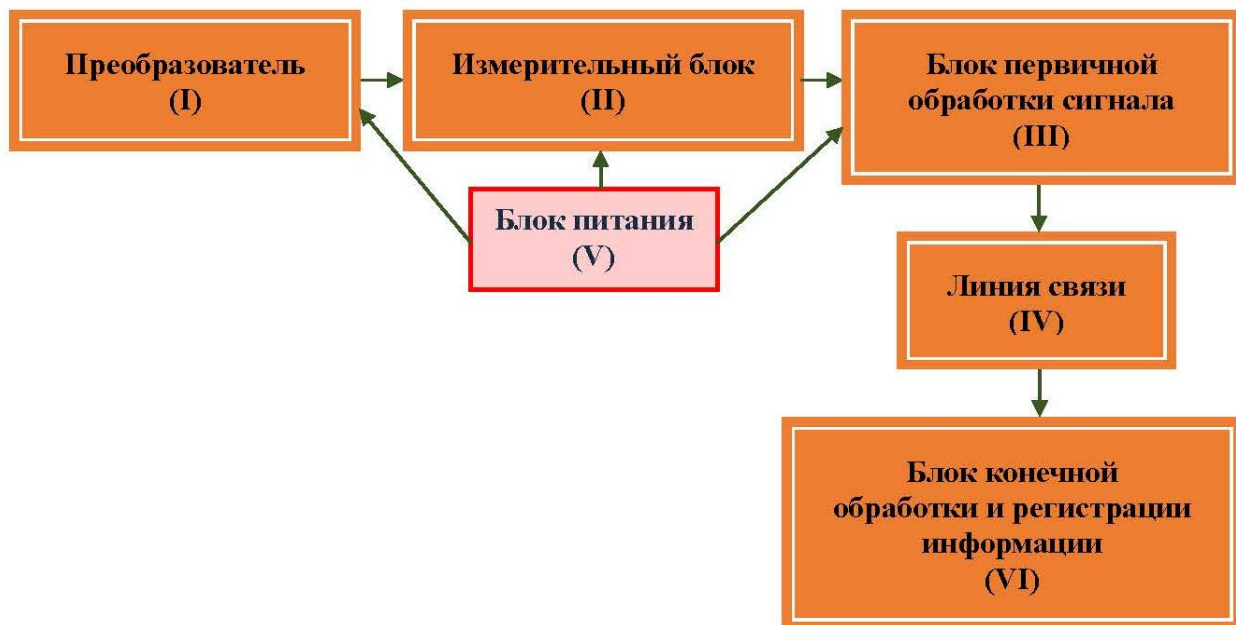


Рис. 1. Блок-схема устройства измерительного датчика

С целью регистрации состояния поверхности в открытых водоемах на сегодняшний день широко применяются преобразователи уровня воды в электрический сигнал струнного типа действия, который основан на реостатическом изменении слабого тока, между двумя параллельно натянутыми струнами при изменении уровня воды. Данный прибор позволяет вести запись уровня воды постоянно, имеет низкую стоимость и простоту своей конструкции, однако он обладает значительной нелинейностью показаний и невысокой чувствительностью, устройство данного прибора кратко опубликовано в литературных источниках [1-5], а схема его устройства представлена на рис. 2.

В экспериментальном бассейне кафедры «Теории и проектирования корабля» им. профессора Ю.Л. Воробьева, Одесского национального морского университета и гидроволновом лотке кафедры «Гидротехнического строительства», Одесской государственной академии строительства и архитектуры, на протяжении длительного времени успешно применяются с целью проведения исследований волновых процессов, преобразователи емкостного типа, обладающие линейностью своих показаний и высокой степенью чувствительности (порядка долей мм).

Преобразователь колебаний уровня поверхности воды в экспериментальном бассейне представляет собой датчик, емкостного типа, преобразующий линейную величину колебания уровня поверхности воды в величину электрической емкости конденсатора. Обкладки конденсатора выполнены в виде частично погруженных в воду параллельных цилиндрических стержней расположенных вертикально, а диэлектриком является находящаяся в бассейне вода [6].

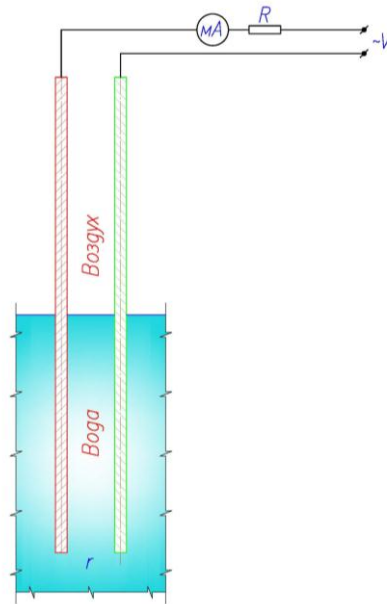


Рис. 2. Электрическая схема структурного уровнемера:  
 $R$  – эталонный резистор;  $mA$  – миллиамперметр

С целью устранения вредного влияния погрешностей на точность измерений удельной проводимости воды, стержни были покрыты равномерным слоем электроизолятора (рис. 3).

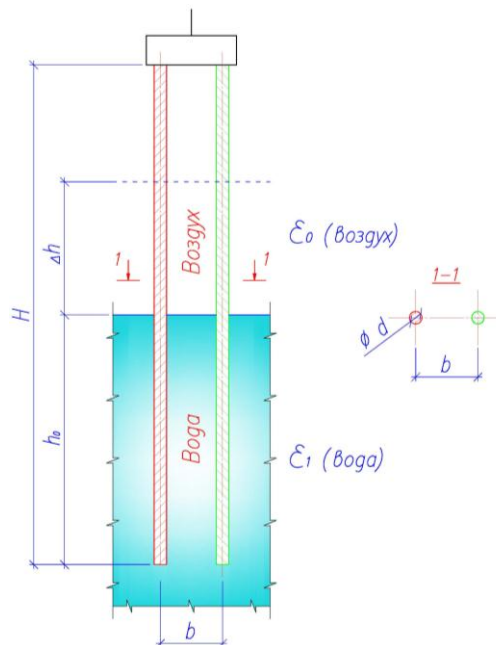


Рис. 3. Схема устройства измерительного датчика

Величину емкости конденсатора  $C_n$  (преобразователя), необходимо определять в соответствии с формулой (1) при  $b > d$ :

$$C_n = C_0 + \frac{\pi}{\ln\left(\frac{b}{d} + \sqrt{\frac{b^2}{d^2} - 1}\right)} \cdot [\varepsilon_0 \cdot H + h \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)], \quad (1)$$

где:  $C_0$  – емкость не погруженных участков электродов при спокойной поверхности;

$H$  – длина измерительных электродов;

$h$  – длина погруженного участка электродов;

$h_0$  – длина погруженного участка электродов при спокойной поверхности;

$\Delta h$  – измерение длины погруженного участка электродов при волнении;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость воздуха;

$\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость воды;

$d$  – диаметр электрода;

$b$  – расстояние между электродами.

При рассмотрении формулы (1) можно выделить три слагаемых; первые два зависят от конструкции преобразователя и являются постоянными величинами для данного экземпляра, а третья – является переменной величиной, линейно зависящая от длины погруженного участка электродов в воду.

При изменении длины  $h$  погруженного участка на малую величину  $\Delta h$  формула (1) приобретает вид (2):

$$C_n + \Delta C_n = C_0 + \frac{\pi}{\ln\left(\frac{b}{d} + \sqrt{\frac{b^2}{d^2} - 1}\right)} \cdot [\varepsilon_0 \cdot H + (h_0 + \Delta h) \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)]. \quad (2)$$

Исходя из чего, следует, что приращение емкости  $\Delta C_n$  преобразователя линейно зависит от изменения длины погруженного участка  $\Delta h$  в воду.

Измерительный блок производит измерение емкости  $C_n$  образовавшегося конденсатора методом определения времени  $T$  его циклического перезаряда через времязадающий измерительный резистор  $R$  между фиксированными напряжениями  $+V_\phi$  и  $-V_\phi$  в прецизионном мультивибраторе в повторяющемся цикле. Для использования участка с линейной зависимостью зарядного тока от приложенного напряжения  $V_\phi$  выбрано равной величине 1,2 В., что меньше стандартной энергии Гиббса образования воды, равной 1,23 В.

Период  $T$  колебаний генератора определяется в соответствии с формулой (3):

$$T = R_{np} \cdot R \cdot C_n, \quad (3)$$

где:  $T$  – период (сек);

$R$  – сопротивление резистора (ом);

$C_n$  – емкость преобразователя (фарад);

$R_{np}$  – постоянное сопротивление преобразователя (ом).

Представив  $C_n$  как сумму начальной емкости преобразователя  $C_{n0}$  с погруженным участком  $h_0$  и изменением погружения  $\Delta h$  вследствие волнения можно получить формулу (4):

$$T_n = T + \Delta T = R_{np} \cdot R \cdot (C_{n0} + \Delta C_n), \quad (4)$$

где:  $\Delta T$  – изменение длительности импульса измерительного генератора от изменения  $\Delta h$  глубины погружения электродов при волнении;

$C_{n0}$  – емкость преобразователя при спокойной поверхности воды;

$\Delta C_n$  – изменение емкости преобразователя вследствие волнения.

На выходе измерительного блока получаем сигнал в виде «П» образных импульсов, период следования которых  $T_n$  в каждый конкретный момент времени пропорционален длине

погружения электродов.

Вследствие сравнительно малой емкости конденсатора  $C_n$  преобразователя (десятька пФ), время  $T_n$  измеряется микросекундами.

На рис. 4 и 5 представлены временные диаграммы напряжений на измерительных электродах и выходного сигнала на выходе измерительного блока при спокойном и при повышенном уровне воды.

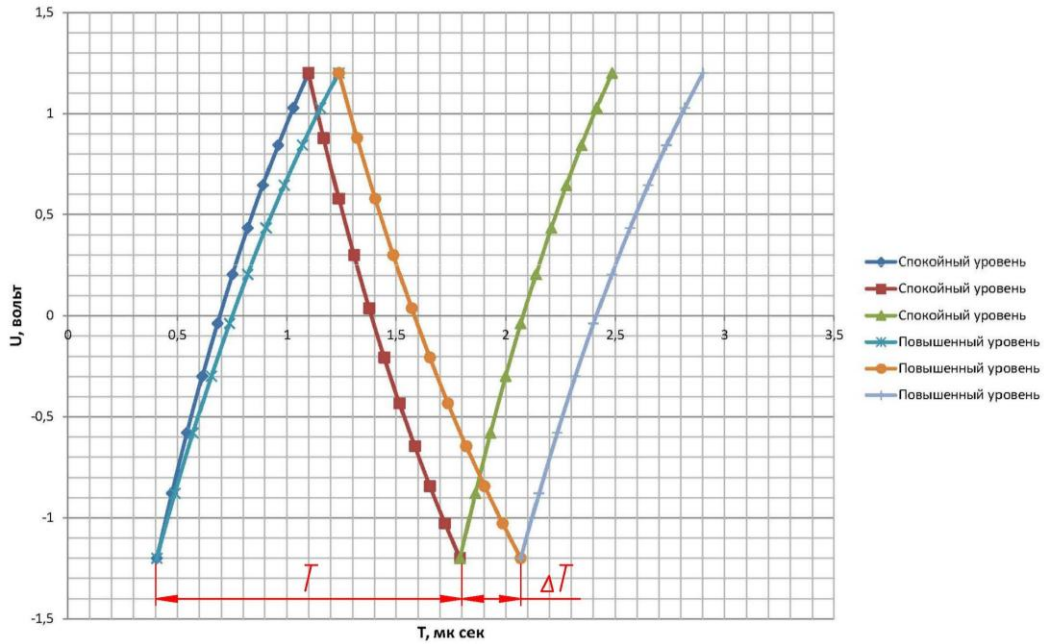


Рис. 4. Временная диаграмма напряжений на измерительных электродах преобразователя

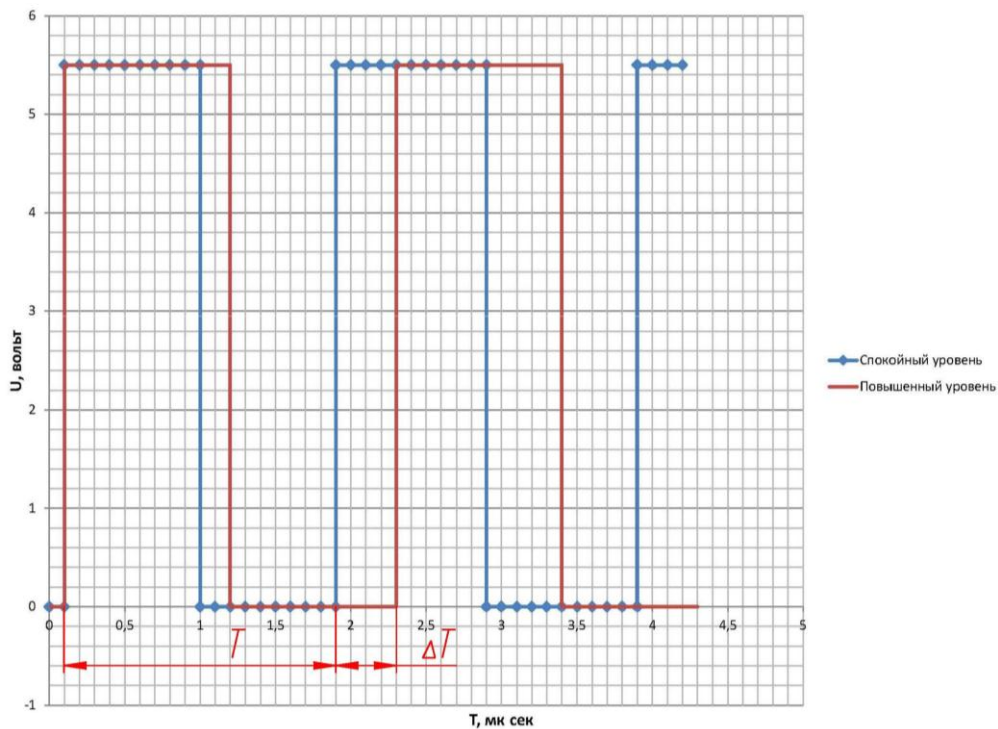


Рис. 5. Сигнал на выходе из измерительного блока

Так как период  $T$  волнения в опытном бассейне измеряется секундами, а требуемое количество точек  $N$  для определения параметров волны не превышает нескольких десятков,

введен блок первичной обработки сигнала, в котором происходит суммирование периодов  $T_u$  следования  $K$  импульсов, где  $K$  – постоянное заранее заданное целое число, определяемое заданным необходимым количеством  $N$  точек определения конфигурацией исследуемой волны и её периодом  $\tau$ .

$$K \leq \frac{\tau}{T_u \cdot N}, \quad (5)$$

где: число  $K$  может иметь величину до десятков тысяч.

Сигнал на выходе этого блока – импульсы с периодом:

$$T_{\text{вых}} = \sum (T_{u_1} + \Delta T_1 + \dots + T_{u_n} + \Delta T_N) \quad (6)$$

или

$$T_{\text{вых}} = \sum (T_{u_1} + T_{u_1} + \dots + T_{u_N}) + \sum (\Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T_N). \quad (7)$$

Обозначив:

$$T_{\text{вых}} = \sum (T_{u_1} + T_{u_1} + \dots + T_{u_N}), \quad (8)$$

$$T_{\text{вых}} = \sum (\Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T_N). \quad (9)$$

В соответствии с чем, позиционно-импульсно модулированный сигнал, где  $\Delta T_{\text{вых}}$  является модулирующим сигналом линейно пропорциональным изменению уровня поверхности воды в бассейне относительно уровня спокойной поверхности  $T_{\text{вых}_0}$  поступает в линию связи, а затем на вход компьютера. С целью проведения анализа проведенных измерений используется специально написанная программа, на языке программирования Python 3. Программа позволяет помимо численных отображений полученных значений параметров волн в гидроволновом бассейне, вести также и графическое изображение исследуемого процесса.

**Выводы.** С целью определения параметров волн в экспериментальных исследованиях, проводимых в гидроволновом бассейне, была создана высокоточная измерительная аппаратура, основана на использовании современных датчиков емкостного типа (уровнемерам). Измерительная система была запроектирована и создана группой сотрудников кафедр «Теории и проектирования корабля» им. профессора Ю.Л. Воробьева, Одесского национального морского университета и кафедры «Гидротехнического строительства» Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Руководил группой заведующий Гидроволновым бассейном ОНМУ Столяров Л.С.. Описанная в статье измерительная аппаратура обладает высокой степенью измерений, которые связаны с определением волновых параметров в лабораторных условиях. В результате проведения экспериментальных исследований, частота проводимых измерений, была доведена до максимального значения равного 1 мГц. При этом получаемые результаты измерений составляли 0,01 мм, что превышает необходимое значение.

### Литература

1. Винокуров Б.Г. Метрология и измерительная техника. Уровнеметрия жидких сред. Учебное пособие для академического бакалавриата / Б.Г. Винокуров. – М.: Изд-во Юрайт, 2016. – 187 с.
2. Шарпов М.В. Датчики. Справочное пособие / М.В. Шарпов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Савлуков. – М.: Изд-во Техносфера, 2012. – 624 с.
3. Михеев В.П. Датчики и детекторы. Учебное пособие / В.П. Михеев, А.В. Просандеев. – М.: МИФИ, 2007. – 172 с.
4. Самсонов Б.Б. Теория информации и кодирование / Б.Б. Самсонов, Е.М. Плохов, А.И. Филоненков. – Ростов-на-Дону: Изд. Феникс, 2002. – 288 с.
5. Харкевич А.А. Борьба с помехами / А.А. Харкевич. – М.: Физ.-мат. лит-ра, 1963. – 275 с.
6. Зуйков А.Л. Гидравлика: учебник: в 2 томах. Т. 2: Напорные и открытые потоки / А.Л. Зуйков, Л.В. Волгина. – М. Изд-во МИСИ – МГСУ, 2017. – 424 с.

## References

1. Vinokurov B.G. Metrologiya i izmeritelnaya tehnika. Urovnometriya gidkikh sred. Uchebnoe posobie dlya akademicheskogo bakalavrata [Metrology and measuring technology. Level measurement of liquid media. A manual for academic baccalaureate]. M.: Izd-vo Jurayt, 2016.
2. Sharpov M.V., Polishuk E.S., Koshevoy N.D., Ishanin G.G., Minaev I.G., Savlukov A.S., Datchiki. Spravochnoe posobie [Sensors. Reference Manual]. M.: Izd-vo Tehnosfera, 2012.
3. Miheev V.P., Prosandeev A.V. Datchiki i detektoru. Uchebnoe posobie [Sensors and detectors. Tutorial]. M.: Izd-vo MIFI, 2007.
4. Samsonov B.B., Plohov E.M., Filonenkov A.I. Teoriya informatsaya i kodirovanie [Information Theory and Coding]. Rostov-na-Donu: Izd-vo. Feniks, 2002.
5. Harkevich A.A. Borba s pomehami [Combating interference]. M.: Fiz.- mat. lit-ru, 1963.
6. Zaykov A.L., Volgina L.V. Gidravlika: uchebnik: v 2 toma. T 2.: Napornye I otkrytie potoki [Hydraulics: a textbook: in 2 volumes. T. 2: Pressure and open flows]. M.: Izd-vo MISI – MGSU, 2017.

### ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ХВИЛЬ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ АПАРАТУРИ

**Столяров Л.С.**, інженер,  
ORSID: 0000-0002-8751-1983

**Чернецкий А.В.**, інженер,  
Chern.od@gmail.com

*Одеський державний морський університет,*

**Синиця Р.В.**, інженер,  
Sinitsa\_roma@ukr.net

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

**Анотація.** Стаття присвячена питанню створення високоточної вимірювальної апаратури, призначеної для визначення параметрів хвиль в гідрохвильовому басейні, при масштабних експериментальних фізичних моделюваннях. Хвилі в басейні формуються за допомогою щитового хвильопродуктора, впливу яких зазнають нові конструкції морських суден, з метою визначення оптимальних параметрів обводів корпусу конструкції судна, а також при дослідженні питань впливу хвиль на моделі огорожувальних та берегозахисних гідротехнічних споруд.

До недавнього часу в лабораторних дослідженнях, для визначення параметрів хвиль використовувалися датчики лампового типу 8 АНЧ - 7, виготовлені заводом №713921 Міністерства авіаційної промисловості СРСР (МАП), які на даний час вже не відповідають необхідним вимогам точності і чистоти вимірювань.

Надана в публікації вимірювальна апаратура, заснована на датчиках ємкісного типу, що перетворюють лінійну величину коливань рівня поверхні води в величину електричної ємності конденсатора. Вимірювальна система дозволяє отримувати високоякісні результати проведених експериментальних досліджень.

В результаті проведених експериментальних дослідженнях, частота вимірювання була доведена до максимального значення рівного 1 мГц і точність одержуваних експериментальних досліджень складала 0,01 мм, що навіть перевищує необхідне значення.

До перспектив подальшого застосування описаної в статті вимірювальної апаратури є отримання більш точних і достовірних результатів в експериментальних дослідженнях, пов'язаних з дослідженням нових типів конструкцій морських суден, а також дослідженні питань впливу хвиль на конструкції огорожувальних та берегозахисних гідротехнічних споруд.

Основним завданням огорожувальних гідротехнічних споруд є захист територій морських портів, а також елементів міської інфраструктури. За допомогою створених датчиків і вимі-

рювальної апаратури передбачається проводити дослідження конструкції огорожувальних гідротехнічних споруд неповного вертикального профілю, з пропозицією подальшої методики розрахунку даних споруд.

**Ключові слова:** гідрохвильовий басейн, експериментальна апаратура, фізичне моделювання, аналогово-цифровий перетворювач.

## DETERMINATION OF WAVE PARAMETERS IN THE LABORATORY CONDITIONS WITH THE HELP OF MODERN MEASURING EQUIPMENT

**Stolyarov L.S.**, engineer,  
ORSID: 0000-0002-8751-1983

**Chernetsky A.V.**, engineer,  
Chern.od@gmail.com

*Odessa State Maritime University*

**Synytsia R.V.**, engineer,  
Sinitsa\_roma@ukr.net

*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

**Abstract.** The article is devoted to the problem of creating a high-precision instrumentation intended for determining the wave parameters in a hydro wave basin, with large-scale experimental physical simulations. Waves in the basin are formed with the help of a shielded wave-producer, which are affected by new designs of sea-going vessels, with the aim of determining optimal parameters for the hulls of the hull of the new vessel design, and also for studying the effects of waves on the model of protective and bank-protecting hydraulic structures.

Until recently, in laboratory studies, according to the definition of wave parameters, tube type 8 ANCH-7 sensors were used, manufactured by the plant No. 713921 of the USSR Ministry of Aviation Industry (MAI), which by now do not meet the required accuracy and purity requirements.

The measurement equipment described in the publication is based on capacitive type sensors that convert the linear value of surface water level fluctuations to the capacitor's electrical capacitance. The measuring system makes it possible to obtain high-quality, results of the conducted experimental studies.

As a result of the experimental studies, the measurement frequency was brought to a maximum value of 1 mHz and the accuracy of the experimental studies obtained was 0,01 mm, which even exceeds the required value.

The prospects for further application of the measuring apparatus described in the article are to obtain more accurate and reliable results in experimental studies related to the investigation of new types of structures of sea-going ships, and also to study the problems of the effect of waves on the construction of protective and coastal hydro technical structures.

The main task of protective hydraulic structures is to protect the territory of seaports, as well as elements of urban infrastructure. With the help of the created sensors and measuring equipment, it is planned to carry out investigations of the design of protective hydraulic structures of an incomplete vertical profile, proposing a further method for calculating these structures.

**Keywords:** hydro wave pool, experimental equipment, physical modeling, analog-digital converter.

Стаття надійшла 5.10.2018