

УДК 622.242.629.124

**О.А. Иванова, старший преподаватель**

*Севастопольский национальный технический университет*

*ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ**

*Приведено описание комплекса цифрового оборудования, разработанного в СевНТУ, для автоматизации проведения экспериментальных исследований пространственных волновых колебаний плавучих океанотехнических систем. Получены результаты использования данного комплекса в опытном бассейне СевНТУ на физических моделях платформ для глубоководного бурения типа TLP и SPAR.*

**Ключевые слова:** модель, устройство, бассейн, пространственное колебание.

**Введение.** При исследовании воздействия волновых нагрузок на океанотехнические системы используются теоретические и экспериментальные методы изучения. Каждый из этих методов обладает самостоятельностью и имеет свои достоинства и недостатки. В общем случае, теоретические методы в виде математических моделей позволяют описывать и объяснять взаимосвязи элементов изучаемой системы или объекта в относительно широких диапазонах изменения переменных величин. Однако при построении теоретических моделей неизбежно введение каких-либо ограничений, допущений, гипотез и т.п. Поэтому возникает задача оценки достоверности полученной модели реальному процессу. Для этого проводится экспериментальная проверка разработанных теоретических моделей. В большинстве случаев именно результаты экспериментальных исследований дают толчок к теоретическому обобщению изучаемого явления. Исследовательские работы в волновых (опытовых) бассейнах проводятся по многим направлениям прикладной гидродинамики, судостроения, морских технологий.

С целью автоматизации проведения экспериментальных исследований в опытном бассейне, был создан комплекс цифрового оборудования. Его назначение – экспериментальное определение характеристик трехмерных (пространственных) колебаний плавучих объектов при воздействии волновых возмущений с различными параметрами, при различных положениях физических моделей относительно продольной оси бассейна и при различном заглублении несущих элементов платформ.

Исследования проводились в опытном (волновом) бассейне СевНТУ при использовании данного комплекса цифрового оборудования, представленного на рисунке 1, в состав которого входит:

- волновой бассейн (1), содержащий волнопродуктор (2);
- рабочий участок (3) (куда помещают испытываемую модель (4): судно, платформу, плавучий кран и т.д.), продольную, поперечную и вертикальную оси которого ориентируют произвольным образом вдоль волнового бассейна;
- волногаситель (5);
- измерители пространственно-временных характеристик поверхностных волн в виде двух волнографов (6), измеряющих перепады давления между глубиной установки приемного отверстия первого и второго волнографов и атмосферным давлением;
- компьютер (7), имеющий первый и второй входы;
- блок волнографов (8), ко входу которого подключены выходы волнографов (опрос измерительных каналов и цифровое преобразование; блок волнографов подключен ко второму входу компьютера;
- блок трехкомпонентных акселерометров и гироскопов (9), измерительные оси которого установлены вдоль осей декартовой правосторонней системы координат, совпадающей с продольной, поперечной и вертикальной осями испытываемой модели, выход этого блока подключен к первому входу компьютера [1, 2].

В отличие от аналогов, приведенный комплекс цифрового оборудования дает полное представление как о волновых воздействиях на испытываемую модель, так и на реакцию на эти воздействия. Что делает возможным исследовать динамику сложных моделей плавучих установок при различных возмущающих воздействиях. Достоверность и долговременная стабильность измерительных каналов комплекса (трехкомпонентных акселерометров и гироскопов) обеспечивается за счет дополнительного введения в его состав физического маятника с возможностью установки на него указанных измерителей. Это позволяет проводить регулярные поверки и метрологическую аттестацию измерительных каналов, так как параметры движения маятника хорошо известны и могут использоваться для регулярных поверок, и при необходимости переградуировок акселерометров и гироскопов.

Данная цифровая аппаратура может использоваться для отработки методики и проведения испытаний в опытовых бассейнах моделей плавучих морских инженерных сооружений со сложными пространственными колебаниями под действием поверхностных волн.

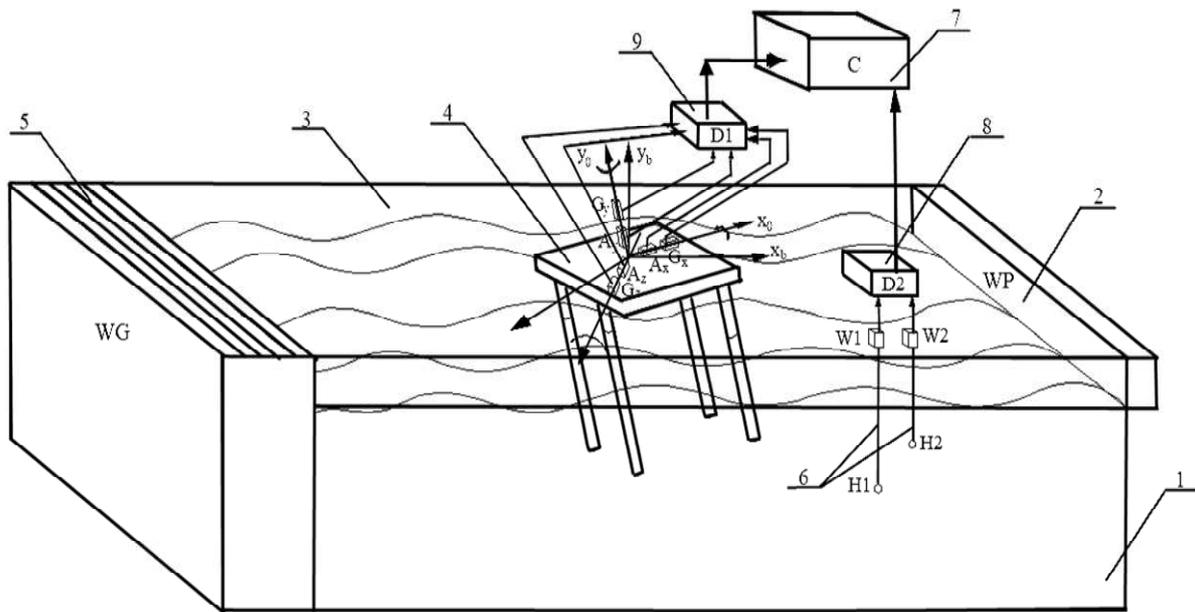


Рисунок 1 – Комплекс для измерения характеристик пространственных колебаний плавучих объектов в опытном (волновом) бассейне

Работа комплекса цифрового оборудования осуществляется следующим образом. Волнопродуктор, выполненный в виде пневматической системы или механической пластинки возбуждает периодические колебания с периодом  $T_w$  (угловой частотой  $\omega_w = 2\pi/T_w$ ). Эти колебания, в виде свободных поверхностных прогрессивных волн, распространяются вдоль бассейна. При этом их длины  $\lambda_w$  определяются методом последовательных приближений из дисперсионного соотношения для поверхностных волн  $\omega_w^2 = gk_w \cdot th(k_w H)$ , где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения,  $k_w = 2\pi/\lambda_w$  – волновое число. Волнографы  $W_1, W_2$  измеряют перепады давлений между атмосферой и водной средой на глубине установки приёмников  $H_1, H_2$ . Амплитуда волны  $a_w$  вычисляется на основе перепада давлений, регистрируемым каждым волнографом по отношению для гидродинамики поверхности волн:

$$a_w = \frac{p_w c h k H}{\rho g c h k (y + H)},$$

где  $p_w$  – амплитуда колебаний давления;  $\rho$  – плотность воды;  $y$  – вертикальная координата, отсчитываемая от поверхности в сторону дна с отрицательным знаком. Статическая обработка показаний волнографов позволяет определить частоту волновых возмущений, фазовый сдвиг  $\gamma$  между колебаниями на основной частоте (частоте максимума) и амплитуду волновых колебаний на заданном расстоянии от поверхности дна. По величине сдвига фазы  $\gamma$  между волнографами вдоль длины бассейна определяется фактическая длина волны по соотношению  $\lambda_r = 2\pi L/\gamma$  ( $L_w$  – расстояние между волнографами вдоль длины бассейна). Для линейных волн отношение амплитуд  $p_w$  на каждой глубине установки приёмников  $H_1$  и  $H_2$  равно:

$$\frac{a_w(y_1)}{a_w(y_2)} = \frac{p_w(y_1) c h k_w H}{\rho g c h k_w (y_1 + H)} \times \frac{\rho g c h k_w (y_2 + H)}{p_w(y_2) c h k_w H} = \frac{p_w(y_1) c h k_w (y_2 + H)}{p_w(y_2) c h k_w (y_1 + H)}.$$

В случае появления в бассейне многократно отраженных волн это соотношение нарушается, тогда производят вычисление параметров этих отраженных волн по показаниям волнографов, разнесенных на указанные расстояния вдоль бассейна и по глубине. В общем случае происходит частичное отражение волны от волногасителя и в этом случае, как показывает анализ, амплитуда прямой и отраженной волны равны соответственно:

$$a_n = 0,5 a_w \left( 1 + \frac{tg \gamma}{tg k_w L_w} \right), \quad a_0 = 0,5 a_w \left( 1 - \frac{tg \gamma}{tg k_w L_w} \right),$$

Если  $\Delta\varphi=0$ ,  $a_n = a_0 = 0,5a_w$ , что соответствует полному отражению волны при  $\gamma = k_w L_w$ ,  $a_n = a_w$ ,  $a_0 = 0$ , т.е. отраженная волна отсутствует. Величины  $a_w$  и  $\gamma$  определяют в результате выполнения спектрального анализа сигналов первого и второго волнографов.

Поверхностные волны, параметры которых определены при помощи системы волнографов, воздействуют на плавучий объект и вызывают его пространственные колебания, т.е. вращательные и поступательные движения относительно продольной  $ox_o$ , поперечной  $oz_o$  и условно-вертикальной  $oy_o$  осей испытываемой модели. Оси блока трехкомпонентных акселерометров и гироскопов устанавливаются вдоль указанных осей  $ox_o, oy_o, oz_o$ . Рассматривается также некоторая неподвижная (базовая) система отсчета, измерительные оси которой  $ox_b$  и  $oz_b$  лежат в плоскости истинного горизонта, а ось  $oy_b$  направлена вертикально вверх и образует с этой плоскостью угол, равный  $90^\circ$ . В качестве такой системы может быть произвольная фиксированная система отсчета, связанная с горизонтальными осями  $ox_b, oz_b$  и вертикальной осью  $oy_b$ , например, система координат, связанная с волновым бассейном. Для связи систем координат  $ox_b, oz_b, oy_b$  и  $ox_o, oz_o, oy_o$  используются углы Эйлера-Крылова. Курсовой угол  $\varphi$  (в некоторых случаях его называют углом рыскания) отсчитывается в горизонтальной плоскости между осью  $ox_b$  и горизонтальной проекцией оси  $ox_o$ ; угол дифферента  $\psi$  (тангажа), характеризующий отклонение продольной оси подвижного объекта от горизонтальной плоскости и угол крена  $\theta$ , характеризующий отклонение оси  $oz_o$  от горизонтальной плоскости при вращении объекта относительно продольной оси. Эти углы определяются при помощи трехосевого гироскопа, что обеспечивает пересчет ускорений, измеренных в подвижной системе координат в ускорения в неподвижной (базовой) системе координат и, следовательно, в составляющие пространственных колебаний подвижного объекта [2, 3].

Проекции единичных векторов системы координат  $ox_o, oz_o, oy_o$  на оси базовой (неподвижной) системы координат  $ox_v, y_v, z_v$  равны направляющим косинусам углов между осями  $ox_o, oy_o, oz_o$  и  $ox_b, oy_b, oz_b$ . Эти направляющие косинусы представлены в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Направляющие косинусы

$a_{ij}$	$x$	$y$	$z$
$x_{v_1}$	$a_{11} = \cos \varphi \cdot \cos \psi$	$a_{12} = \sin \varphi \cdot \sin \theta - \cos \varphi \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi$	$a_{13} = \sin \varphi \cdot \cos \theta + \cos \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi$
$y_{v_2}$	$a_{21} = \sin \psi$	$a_{22} = \cos \theta \cdot \cos \psi$	$a_{23} = -\sin \theta \cdot \cos \psi$
$z_{v_3}$	$a_{31} = -\sin \varphi \cdot \cos \psi$	$a_{32} = \cos \varphi \cdot \sin \theta + \sin \varphi \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi$	$a_{33} = \cos \varphi \cdot \cos \theta - \sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi$

Спектральная обработка записей этих колебаний тремя акселерометрами и гироскопами позволяет выделить их основные частоты  $\omega$  (частоты максимумов спектров флуктуации), которые совпадают с частотами волновых возмущений, вызывающих эти колебания [6].

Таким образом, установка измерительных осей блока трехкомпонентных акселерометров и гироскопов вдоль осей декартовой правосторонней системы координат, совпадающей с продольной, поперечной и условно-вертикальной осями испытываемой модели при подключении выхода этого блока к первому входу компьютера, ко второму входу которого подключен блок волнографов, обеспечивает полноту информации о воздействии волн на испытываемую модель благодаря синхронным измерениям параметров прямой и отраженной волн в системе координат, связанной с бассейном, а также поступательных и вращательных колебаний испытываемой модели, измеренных в этой же системе координат.

С целью обеспечения достоверности данных и долговременной стабильности метрологических характеристик трехкомпонентных акселерометров и гироскопов в состав комплекса дополнительно введен физический маятник, что позволяет проводить регулярные поверки и метрологическую аттестацию указанных измерителей, так как параметры движения маятника хорошо известны и могут использоваться для регулярных поверок, и при необходимости переградуировок измерительных каналов акселерометров и гироскопов [6].

Рассмотренная цифровая система была использована для исследований колебаний модели полупогружных платформ в опытовом бассейне СевНТУ с целью верификации разработанных моделей таких колебаний с учетом нелинейных эффектов [4, 5]. На рисунке 2, а и 2, б показаны спектры

колебаний углов дифферента и крена модели при ее минимальном заглублении, а также спектры когерентности и фазы этих колебаний. Основной пик спектра соответствует периоду волн в бассейне (около 0,95 с). Наряду с ним на спектре проявились максимумы на комбинационных частотах, которые возбуждаются из-за нелинейных эффектов колебаний платформы. Колебания по крену и дифференту на основной частоте волнения имеют высокую когерентность, которая резко уменьшается с увеличением частоты. Фазовый сдвиг между колебаниями дифферента и крена близок к 90 градусам, т.е. такие колебания находятся в квадратуре. Следует отметить высокое пространственное разрешение спектральных характеристик по частоте. На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что данный созданный комплекс цифрового оборудования для определения пространственных колебаний подвижных объектов охватывает значительный спектральный диапазон возмущений моделей поверхностными волнами, что позволяет использовать его для исследования нелинейных эффектов, связанных с параметрическим возбуждением высокочастотных гармоник в общем спектре колебаний исследуемых физических моделей в экспериментальных опытовых бассейнах.

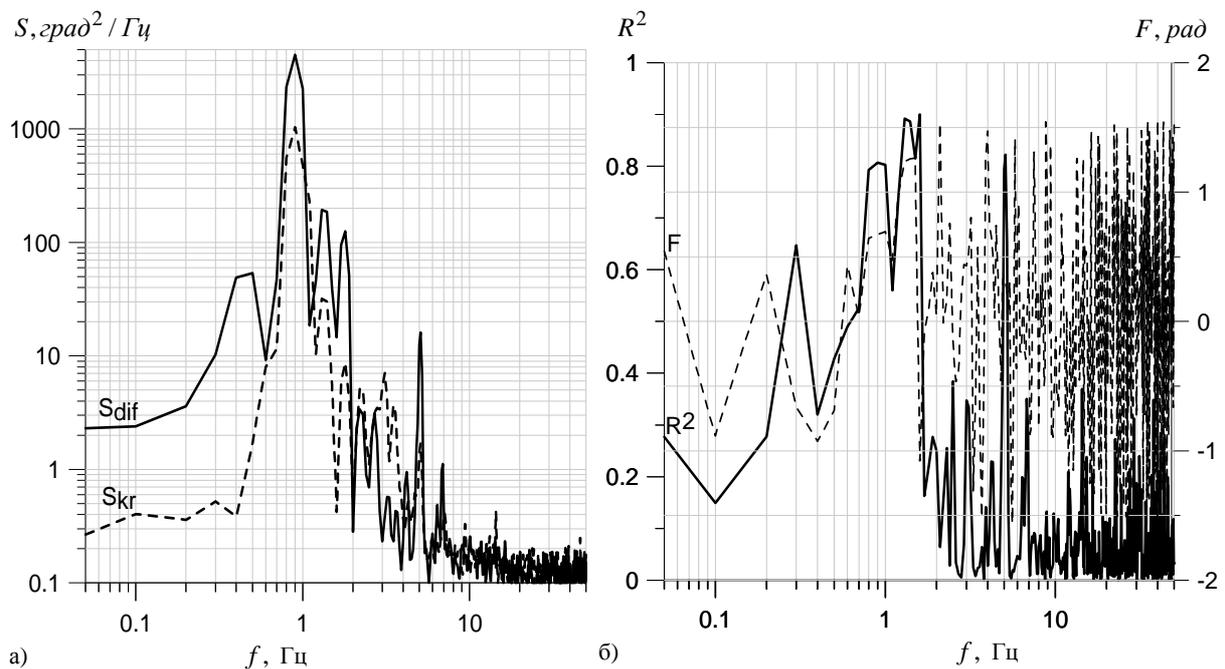


Рисунок 2 – Спектры колебаний по дифференту  $S_{dif}$  и по крену  $S_{kr}$  модели полупогружной платформы (а); спектры когерентности  $R^2$  и фазы  $F$  колебаний модели полупогружной платформы (б)

Задачи дальнейших исследований состоят в необходимости решения проблемы оптимизации конструктивных параметров глубоководных буровых платформ для условий Черного моря на основе современных методов численного гидродинамического моделирования и экспериментальных исследований динамики физических моделей глубоководных платформ в опытном бассейне.

**Заключение.** В данной статье описан комплекс цифровой аппаратуры, используемый для экспериментального исследования колебаний физических моделей платформ при воздействии на них волновых возмущений с различными параметрами, при различных положениях и заглублении физических моделей в опытном бассейне. Приведена схема автоматизации проведения экспериментальных исследований в волновом бассейне. Выявлены преимущества данного комплекса цифровой аппаратуры по сравнению с аналогами. Определены характеристики угловых и поступательных движений физических моделей для глубоководного бурения при использовании данного комплекса.

Применение разработанного комплекса экспериментального оборудования и результаты экспериментальных исследований в дальнейшем могут использоваться в области судостроения, морских технологий и в области экспериментальной гидромеханики, в частности для исследования в опытовых бассейнах моделей плавучих морских сооружений со сложными пространственными колебаниями под действием поверхностных волн. Практическое применение этого комплекса аппаратуры отражено в отчетах по научно – исследовательским работам: «Воздействие морской среды на океанотехнические системы» номер государственной регистрации 0106U013190, шифр «Океанотехника», «Гидродинамика

глубоководных платформ для условий Черного моря», номер государственной регистрации 0111U003328, шифр «Платформа» и в актах внедрения.

**Библиографический список использованной литературы**

1. Иванова О.А. Цифровое устройство для измерения параметров пространственных колебаний подвижных объектов / О.А. Иванова, В.М. Кушнир, И.С. Дубовик // Системы контроля окружающей среды: сб. науч. тр. МГИ НАН Украины. — 2010. — Вып. 13. — С. 35–38.
2. Павловский М.А. Теория гироскопов / М.А. Павловский. — К.: Вища школа, 1998. — 303 с.
3. Обморшев А.Н. Введение в теорию колебаний / А.Н. Обморшев. — М.: Наука, 1965. — 276 с.
4. Морева И.Н. Нелинейные колебания полупогружных морских платформ на волнении / И.Н. Морева, А.И. Парфеньев, В.М. Кушнир // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. докл. VI-ой междунар. науч. конф. аспирантов и студентов. ДонНТУ–2007, Донецк. — Донецк, 2007. — Т. 2. — С. 218–219.
5. Морева І.М. Гідродинаміка просторових коливань напівзанурюваної платформи у штормових умовах: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.01: захищена 22.04.09 / Морева Ирина Николаевна, ОНМУ. — Одеса, 2009. — 123 с.
6. Цифровая система для исследований океанотехнических систем в волновых бассейнах / В.М. Кушнир, В.Р. Душко, И.Н. Морева, О.А. Иванова, С.В. Федоров // Вісник ОНМУ: сб. наук. пр. — Одесса, 2012. — Вып. № 34 (1). — С. 85–102.

*Поступила в редакцию 27.08.2013 г.*

**Іванова О.О. Автоматизація проведення експериментальних досліджень в дослідному басейні**

У статті наведений опис комплексу цифрового обладнання, розробленого в СевНТУ для автоматизації проведення експериментальних досліджень просторових хвильових коливань плавучих океанотехнічних систем. Отримані результати використання комплексу в дослідному басейні СевНТУ на фізичних моделях платформ для глибоководного буріння типу TLP і SPAR.

**Ключові слова:** модель, пристрій, басейн, просторове коливання.

**Ivanova O.A. Automation of leadthrough of experimental researches is in towing tank**

The article describes the complex digital equipment developed in SevNTU automation of experiments in the space of wave oscillations floating ocean engineering systems. The results obtained using complex pool SevNTU research on physical models for deepwater drilling platforms such as TLP and SPAR.

**Keywords:** model, device, pool, spatial vibration.