

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ВОЛНОГРАФ

А.Н.Греков., Н.А.Греков*,
А.С.Строганов

Севастопольский национальный
технический университет
г. Севастополь, Стрелецкая балка,
Студгородок
E-mail: RT.SevGTU@stel.sebastopol.ua

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Сделан анализ работы гидродинамического волнографа, приведены амплитудно-частотные характеристики в зависимости от диаметра и длины присоединительных трубок. Приведена структурная схема прибора и результаты измерения, выполненные автоматизированным волнографом.

При исследовании явлений, связанных с воздействием волнений на надводные и подводные объекты, используются различные волнографы: струнные, ёмкостные, индуктивные и т.д. Из гидростатических волнографов наиболее известны ГМ-16, ГМ-32 и их аналоги [1]. Принцип действия этих приборов основан на том, что на глубине, большей половины длины волны, возмущение от поверхностных волн практически отсутствует. И если поместить ниже этого уровня датчик давления, то его показания будут соответствовать среднему давлению *in situ* и не зависеть от поверхностного волнения. Однако, описанный гидростатический волнограф не учитывает изменения атмосферного давления, не работает там, где глубина бассейна меньше половины длины волны, частотные характеристики сильно зависят от размеров и массы поплавка, невозможно исследовать внутренние волны и исследовать поле давления волн вблизи подводных объектов. В измерительной технике как-то обошли стороной гидродинамические волнографы, которые могут измерять давление на глубине с помощью присоединительных трубок. Связано это с тем, что столб воды высотой *h*, находящейся в этой трубке, вносит погрешность при определении высоты столба жид-

кости, в которую опущена присоединительная трубка, а также не исследованы амплитудно-частотные характеристики этих трубок. В предлагаемой работе сделаем оценку этих погрешностей, определим частотную характеристику измерителя и предложим методику работы с разработанным прибором, а также обсудим результаты измерения, выполненные этим прибором.

Имеется дифференциальный датчик давления P_d (рис.1), к одному из выводов датчика герметично присоединена трубка диаметром d и длиной L , в которой создаётся давление P_n , на второй вход датчика воздействует атмосферное давление P_A . Присоединительная трубка опущена вертикально на глубину M , в результате чего она заполняется водой на высоту h .

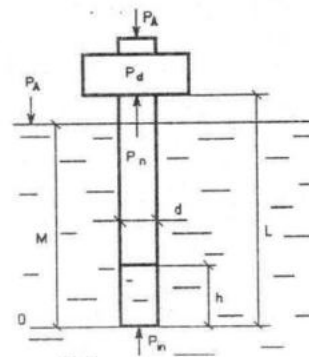


Рис. 1 – Давления, действующие на дифференциальный датчик и присоединительную трубку

Воспользовавшись понятием поверхности уровня, в качестве которой примем горизонтальную плоскость, проходящую через нижнюю часть присоединительной трубки, запишем равенство

$$\rho g M + P_A = \rho g h + P_n, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения.

Считаем, что в присоединительной трубке объёмом $\frac{\pi d^2}{4} \cdot L$ до погружения в воду было давление P_A , после погружения объём стал $\frac{\pi d^2}{4} \cdot (L - h)$ и давление P_n . Для изотермического процесса величина P_n равна

$$P_n = \frac{LP_A}{L-h} \quad (2)$$

Окончательно с учётом уравнений (1) и (2) получим соотношение, связывающее h с M

$$h^2 + h \left(M + L + \frac{P_A}{\rho g} \right) + ML = 0. \quad (3)$$

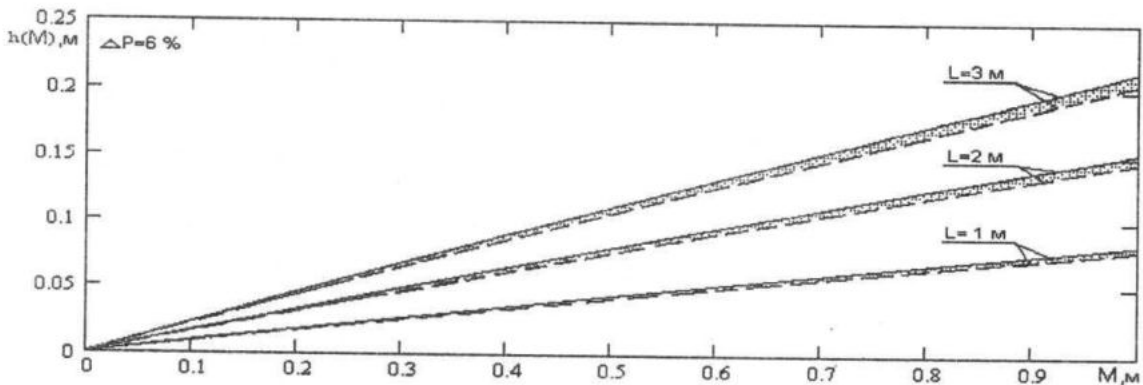


Рис. 2 – Зависимость высоты столба жидкости h от величины заглубления M присоединительной трубки при различной ее длине L

Реально атмосферное давление P_A может изменяться до 6 %, что составляет $\Delta P_A \approx 6 \text{ кПа}$. Область приращения Δh от изменения ΔP_A показана на графике (рис. 2) и, например, при заглублении на 1 м трубки длиной $L = 1$ м колебания Δh от влияния атмосферного давления могут достигать до 0,004 м.

Далее исследуем влияние переменного давления, воздействующего на датчик давления P_d через присоединительную трубку, которую можно рассматривать как гидравлический фильтр. Воспользуемся методом электромеханических аналогий [2] по переменным характеристикам. Эквивалентная электрическая схема гидравлического фильтра представлена на рис. 3.

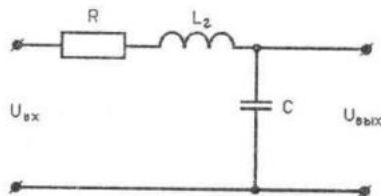


Рис. 3 – Эквивалентная электрическая схема гидравлического фильтра

Используя уравнение (3) построим графики $h = f(M)$ для различных размеров L присоединительных трубок.

Из графика (рис.2) следует, что максимальная высота столба h при погружении присоединительной трубки на глубину $M = 1$ м составляет для L : 1 м – 0,08 м; 2 м – 0,15 м; 3 м – 0,22 м.

Гидравлическое сопротивление R можно записать [3]:

$$R = \frac{8}{\pi \cdot r^4} \cdot (\eta_{вод} \cdot h + \eta_{воз} \cdot (L - h)), \quad (4)$$

где $\eta_{вод}$ – динамическая вязкость воды; $\eta_{воз}$ – динамическая вязкость воздуха; r – внутренний радиус трубки.

Выражение для эквивалентной индуктивности L_2 будет иметь вид:

$$L_2 = \frac{\rho \cdot h}{\pi \cdot r^2} + \frac{4 \cdot \rho_{воз} \cdot (L - h)}{3 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (5)$$

где $\rho_{воз}$ – плотность воздуха.

Выражение для эквивалентной емкости C запишем как:

$$C = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot (L - h)}{\rho_{воз} \cdot V_{зв}^2 + \rho \cdot g \cdot (L - h)}, \quad (6)$$

где $V_{зв}$ – скорость звука в воздухе

Давление внутри рабочей полости присоединительной трубки равно P_n (рис. 1). Дифференциальный датчик давления измеряет давление, равное:

$$P_d = P_n - P_A. \quad (7)$$

$$K(\nu) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{P_d}{P_n} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 \cdot L_2 \cdot C)^2 + (\omega \cdot R \cdot C)^2}}, \quad (8)$$

где $\omega = 2\pi\nu$; ν - частота Гц.

Используя выражение (8) построим амплитудно-частотную характеристику гидравлических фильтров при различных диаметрах присоединительных трубок d : $K1(\nu)$ для $d = 0,4$ м; $K2(\nu)$ для $d = 0,04$ м; $K3(\nu)$ для $d = 0,004$ м при длине трубки $L = 1$ м и заглублении $M = 1$ м.

Если давление на входе трубки обозначить P_{in} , тогда для эквивалентной схемы (рис. 3) с учётом выражений (4 - 6) передаточная функция $K(\lambda)$ будет иметь вид:

Результаты расчётов представлены на рис. 4. Из графика отчётливо видно, что увеличение диаметра присоединительной трубки не приводит к смещению по оси частот резонансной характеристики гидравлического фильтра, однако при этом увеличивается добротность фильтра.

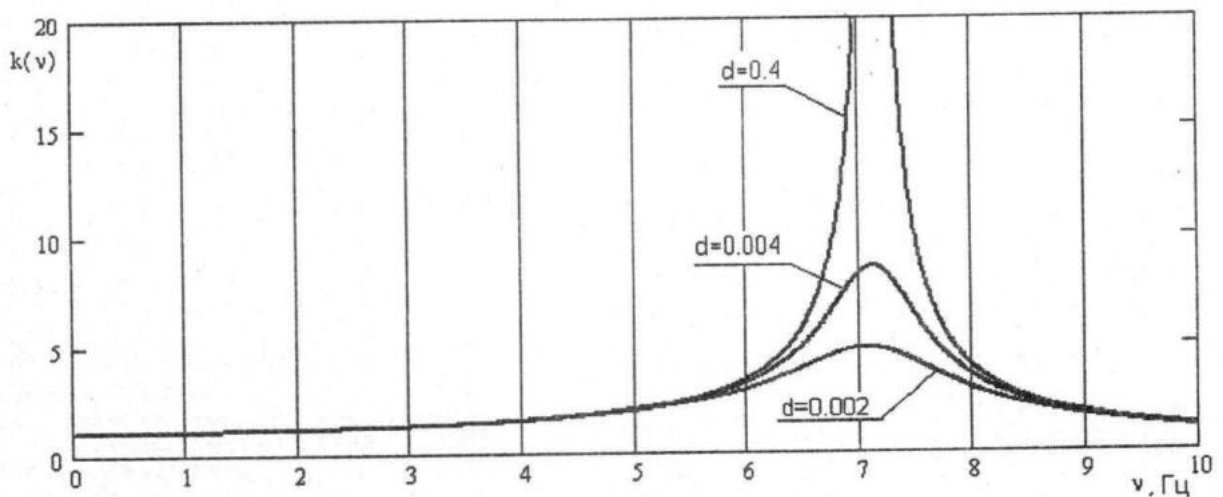


Рис. 4 — АЧХ гидравлических фильтров при различных диаметрах трубок

И, следовательно, для получения равномерных АЧХ в области низких частот необходимо диаметр трубки выбирать $\sim 0,002 \div 0,004$ м.

Рассмотрим АЧХ гидравлического фильтра при различной длине L присоединительной трубки. Для этого воспользуемся уравнением (8) и построим зависимость

$K(\nu)$ для различных L : 1 м, 2 м, 3 м при фиксированном диаметре трубки d , которая представлена на рис. 5. Из графика (рис. 5) видно, что увеличение длины трубки L приводит к смещению резонансной характеристики гидравлического фильтра в область низких частот.

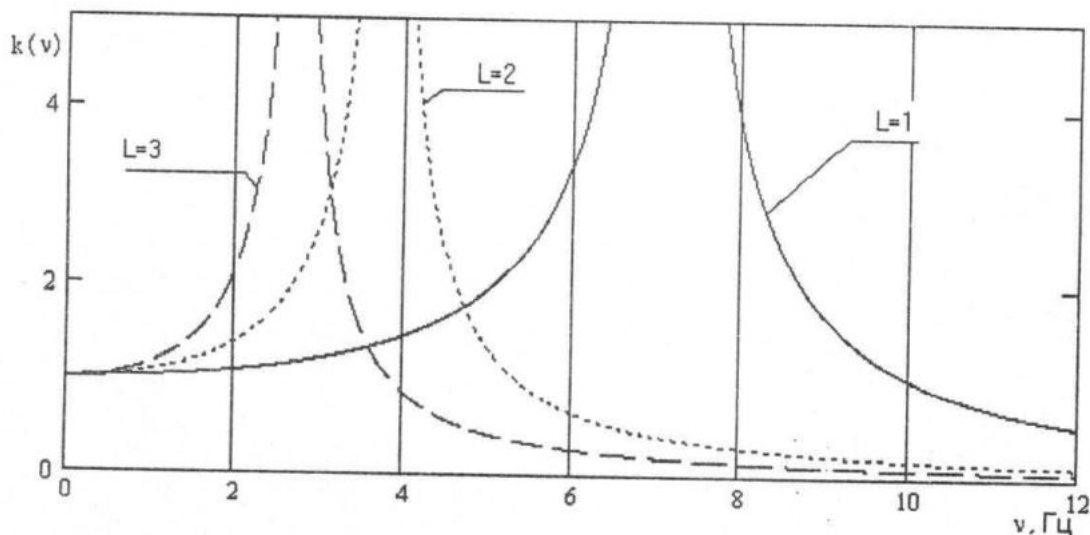


Рис. 5 – АЧХ гидравлических фильтров при различных длинах присоединительных трубок

Давление P_{in} определяется как $\rho g M + P_A$ и если имеется поверхностное волнение, то с учётом теории гравитационных поверхностных волн [4] можно записать

$$P_m = \rho g M + \rho g A \frac{chk(H-M)}{chkH} + P_A, \quad (9)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; A – амплитуда волны; H – глубина воды в бассейне.

Используя уравнения (8) и (9) построим зависимость величины давления P_d от поверхностной волны длиной λ . График зависимости $P_d = f(\lambda)$ представлен на рис. 6, при расчёте использовались следующие значения: амплитуда $A = 0,2$ м, заглубление трубки $M = 1$ м, глубина бассейна $H = 3$ м, давление $P_A = 100$ кПа.

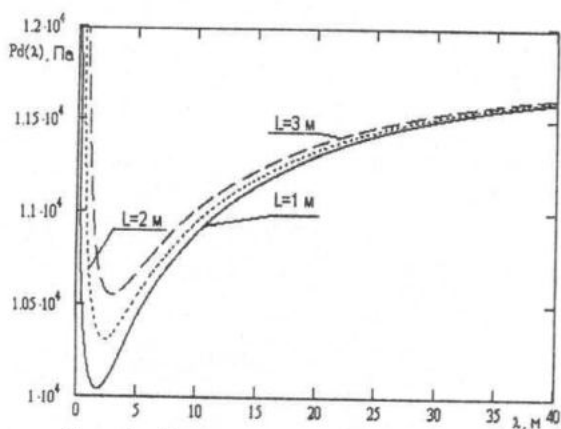


Рис. 6 – Зависимость давления P_d от поверхностной волны длиной λ

Результаты моделирования показывают следующее:

1. Увеличение длины L присоединительной трубки приводит к увеличению чувствительности измерителя P_d в области низких частот, однако при этом значительно на процесс измерения оказывает влияние неравномерность АЧХ фильтра, которую трудно учитывать при проведении измерений. Кроме того, увеличение длины L приводит к увеличению погрешности от влияния столба жидкости высотой h .

2. Увеличение диаметра d присоединительной трубки приводит к подъёму чувствительности в области резонанса гидравлических фильтров.

Полученные результаты позволяют сформулировать оптимальные требования к гидродинамическому волнографу:

1. Длину присоединительной трубки L желательно выбирать минимальной ~ 1 м, при этом область резонанса фильтра смещается за пределы 6 Гц и не влияет на процесс измерения параметров волнения, частота которого находится ниже 5 Гц.

2. Диаметр присоединительной трубки желательно выбрать в пределах $0,002 \div 0,004$ м, что значительно улучшает неравномерность АЧХ гидравлического фильтра.

В результате анализа работы гидродинамического волнографа был разработан и сконструирован прибор, структурная схема которого приведена на рисунке 7. Двухкомпонентный измеритель волнения состоит из двух дифференциальных датчиков

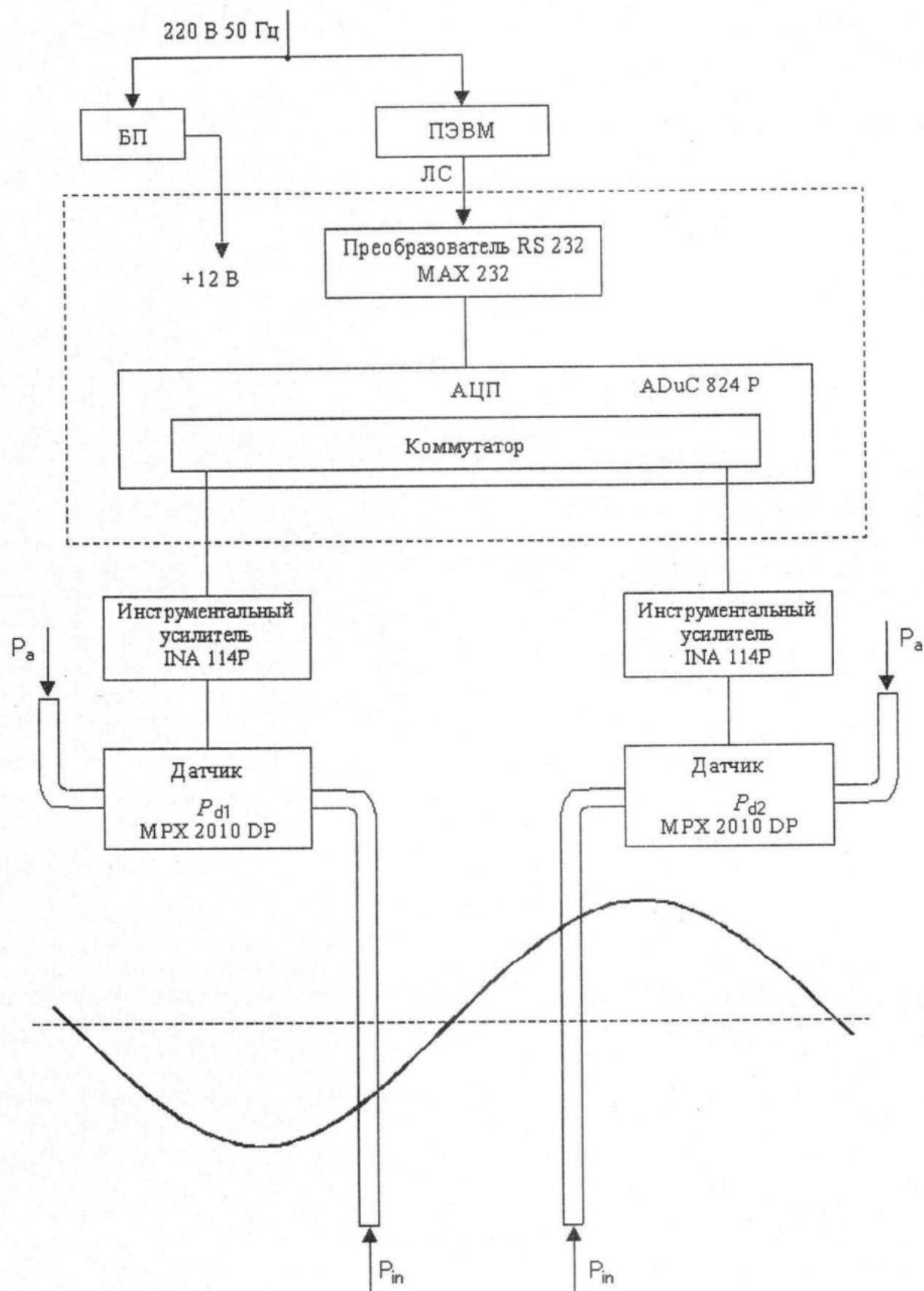


Рис. 7 – Структурная схема гидродинамического волнографа

давления MPX 2010D, двух инструментальных усилителей INA 114, коммутатора с АЦП ADuC 824, преобразователя RS232 – MAX 232, блока питания БП, линии связи ЛС.

Работа прибора заключается в следующем. Давление P_{in} , создаваемое волной, передается через гидравлический фильтр на один из входов датчика давления P_d , где преобразуется в напряжение, которое усиливается инструментальным усилителем до стандартной величины, затем с помощью коммутатора, расположенного в ADuC 824, поочередно подается на вход АЦП, где преобразуется в цифровой сигнал и затем через преобразователь RS232 подается на вход COM – порта ПЭВМ.

Созданный двухкомпонентный автоматизированный гидравлический волнограф проходил испытания в опытном бассейне СевНТУ на кафедре «Корабле-строения и океанотехники». С помощью прибора исследовалось распространение волновых ее возмущений, определялась высота волны,

период и длина, статистические характеристики изменчивости этих величин, спектры волновых возмущений и характеристики их вертикальной структуры при различных режимах работы волнопродуктора.

На рисунке 8 (как пример) представлены результаты измерений прибором в опытном бассейне. Вначале, перед проведением измерений проводились градуировки волнографов, которые заключались в том, что при отсутствии волнения присоединительные трубки опускались на контролируемую с помощью линейки глубину и считывался соответствующий код N . Таким образом, M сравнивалась с выходным кодом N и далее вычислялась градуировочная характеристика $M = f(N)$.

В проводимом эксперименте вводные трубки располагались на глубине $M \approx 20$ см, расстояние между трубками составляло 1 м, расстояние от стенки бассейна до трубок – 30 см.

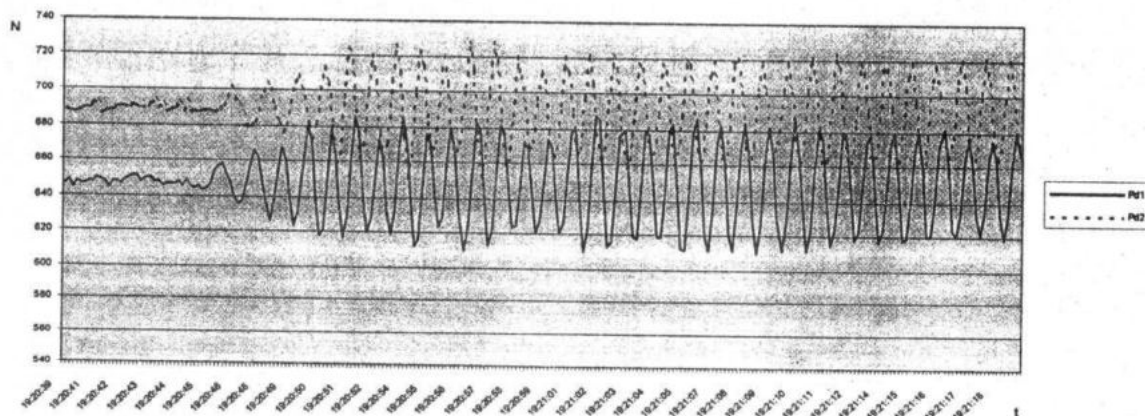


Рис. 8 – Пример результатов измерений, выполненных гидродинамическим волнографом в опытном бассейне

Из рис. 8 видно нарастание амплитуды волны при включении волнопродуктора, хорошо просматривается фазовый сдвиг генерируемой волны, неравномерность амплитуды из-за неидеальной работы волнопродуктора. Используя материал, приведенный в статье, можно рассчитать амплитуду поверхностной волны, фазовый сдвиг и другие характеристики, необходимые исследователям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерюгин К.К., Степанюк И.А. Морская гидрометрия. Л.: – Гидрометеоздат, 1974.– 390 с.
2. Сапожков М.А. Электроакустика. М., «Связь», 1978. – 270 с.
3. Альтшуль А.Д. и др. Гидравлика и аэродинамика. М., Стройиздат, 1987. – 414 с.
4. Доронин Ю.П. Динамика океана. Л.: – Гидрометеоздат, 1980.– 303 с.