УДК 532.59

**Н.М. Лиходеев, А.А. Родин, А.А. Куркин**

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ДОННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород*

В работе представлено описание лабораторных экспериментов по генерации и распространению поверхностных волн, сгенерированных волнопродуктором в экспериментальной установке на базе НИЛ МПиТК в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Описан способ регистрации волновых характеристик с помощью датчиков давления, расположенных в съемном донном профиле. Разработан программный скрипт для визуализации данных, полученных с помощью системы донных датчиков.

*Ключевые слова:* лабораторный эксперимент, волновые пакеты, поверхностные волны

## Введение

Накат волн на откосы берега и откосы различных геометрических форм является традиционной темой исследования гидродинамики прибрежной зоны [1 – 3]. Наряду с аналитическими результатами и результатами численных экспериментов задачи наката, как правило, достаточно легко реализуются в лабораторных экспериментах в различных опытовых бассейнах.

При запуске экспериментов в гидродинамической установке НИЛ МПиТК с новыми условиями одним из важных аспектов является проведение серии экспериментов на повторяемость. При этом проводится серия экспериментов с абсолютно одинаковыми начальными условиями. Известно, что поведение волны в одних и тех же условиях может отличаться в силу нелинейности происходящий процессов. В данной работе результаты визуализации водной поверхности, полученные с помощью датчиков давления, приводятся для серии экспериментов, нацеленных на выявлении повторяемости процесса распространения волн над протяженным подводным уступом.

Для оценки характеристик генерируемых волновых пакетов используется программное обеспечение и средства численной обработки сигналов.

## Лабораторные эксперименты

Лабораторные эксперименты проводились в гидродинамическом бассейне в научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф в НГТУ им. Р.Е. Алексеева (рис. 1). Бассейн, в котором проводились опыты, имеет следующие размеры: длина - 6.5 м; ширина - 0.5 м; высота - 1 м.

Лабораторный бассейн оснащен двумя типами волнопродукторов для реализации различных начальных условий: вертикальной перегородкой, которая позволяет герметично разделять разные уровни водяного столба, и волнопродуктором весельного типа, приводимым в движение с помощью шагового двигателя и генерирующим волны различных амплитуд.

Для моделирования задачи распространения поверхностных волн используется герметичная вертикальная заслонка, которая при старте эксперимента со скоростью 1 м/с поднимается вверх, и волнопродуктор весельного типа.

В зависимости от типа эксперимента бассейн либо разделялся на две емкости с помощью герметичной вертикальной перегородки с разными уровнями жидкости, которая позволила проводить эксперименты по «обрушению плотины», либо уровень жидкости был одинаковым по всей длине бассейна и использовался волнопродуктор весельного типа, генерирующий волновые пакеты с разными частотами и амплитудами. Схематическое изображение начальных условий экспериментов представлено на рис. 1.

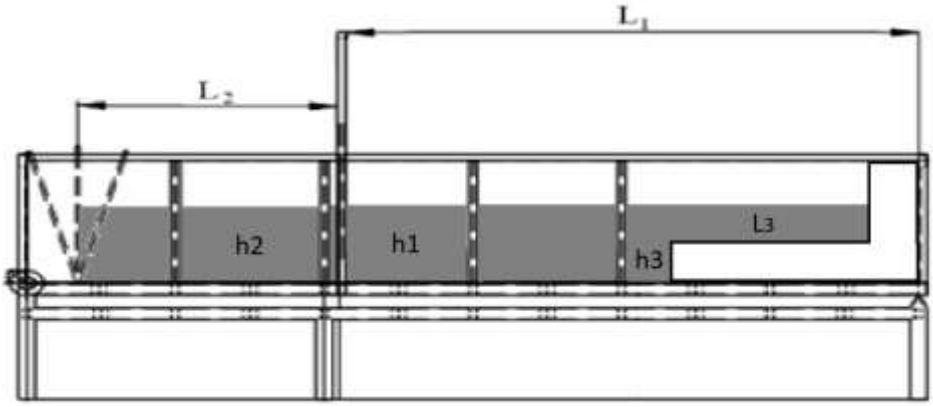



**Рис. 1. Схематическое изображение условий экспериментов в гидродинамическом бассейне**

Здесь $h_1$ - уровень слоя жидкости в правой части бассейна $h_2$ – уровень слоя жидкости в левой части бассейна; $L_1$ и $L_2$ , соответственно, - длина левой и правой полуёмкости бассейна. Степунчатое дно имеет высоту $h_3$, составляющиее 0.2 м и длину $L_3$, которая равнялась 3.3 м. Длина $L_1$ при этом во всех экспериментах составляла 1.5 м, а $L_2$, соответственно 5 м.

Профиль подводного уступа, выполненный из оргстекла, оснащен системой донных датчиков давления, которые измеряют толщину жидкости. Всего в ступенчатом дне установлено восемь датчиков, замеряющих давление водяного столба и один датчик, замеряющий атмосферное давление. Конфигурация ступенчатого дна представлена на рис. 2.

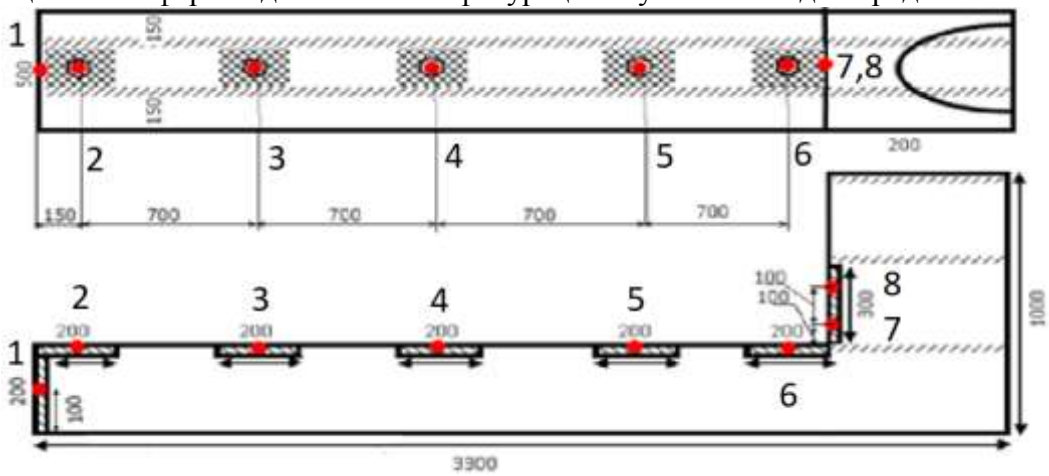



**Рис. 2. Схема ступенчатого дна с нумерацией датчиков**

Используемые датчики – кварцевые преобразователи давления ПДК-Р-М, которые обеспечивают прецизионное измерение абсолютного и избыточного давления (на фоне абсолютного давления значением не более 800 мм.рт.ст.). Высокие характеристики этих преобразователей достигаются путем использования прецизионных кварцевых резонаторов-сенсоров, частота которых изменяется при соответствующем изменении воздействующего на них давления.

Датчики управляются регистратором частоты РЧ-24М. Регистратор РЧ-24М представляет собой программно-аппаратный комплекс для прецизионного измерения частоты. Устройство состоит из электронного блока (ЭБ) и программной оболочки – драйвера управления. Устройство имеет 24 входных канала параллельного опроса.

Регистратор РЧ-24М позволяет измерять частоту в диапазоне от 100 Гц до 100 кГц. Время измерения частоты лежит в диапазоне от 5 мс до 2 с. Измеряемый регистратором сигнал может представлять собой прямоугольные импульсы или иметь синусоидальную форму. Диапазон амплитуд входного сигнала находится в пределах от 1,8 до 12 В. Основная

абсолютная погрешность измеряемой частоты составляет ± 0,0001 Гц при времени измерения 1 с, с частотой 1 кГц и ± 0,01 Гц при времени измерения 0,01 с, с частотой 1 кГц.

В проведенных экспериментах генерировались волновые пакеты, представляющие собой пять импульсов с частотой в 1 Гц. Уровень жидкости был одинаковым на всей длине лабораторной установки и составлял 0.3 м.

Рассмотрим данные о поведении волнового пакета, полученные с датчика, расположенного на расстоянии 0.15 м от начала ступеньки или 3.35 м от весельного волнопродуктора для 1 эксперимента.

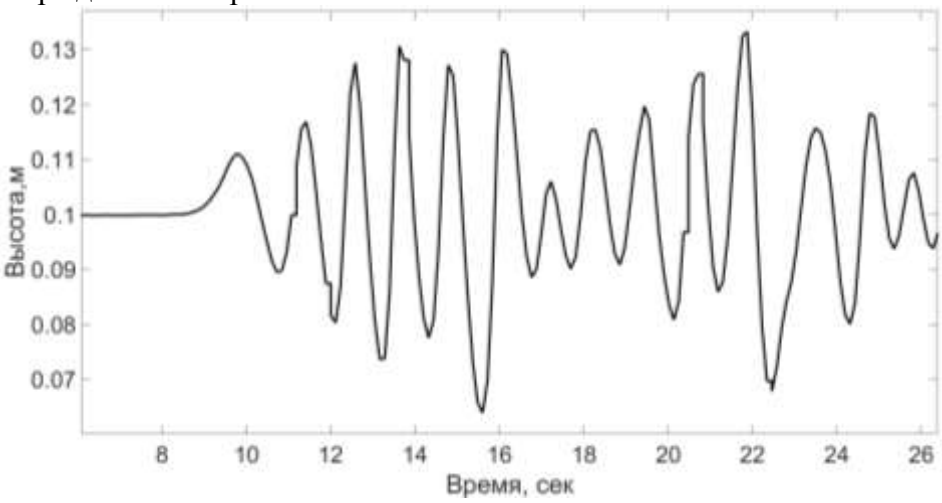



**Рис. 3. Поведение водной поверхности при движении волнового пакета, представляющего собой 5 импульсов с частотой в 1 Гц на расстоянии 3.35 метра от волнопродуктора**

На рис. 3 видно, что график поведения водной поверхности начинается на высоте 0.1 м. Это связано с тем, что высота ступеньки составляет 0.2 м, а уровень жидкости на протяжении всего бассейна составлял 0.3 м. Волновой пакет состоит из пяти волн. На графике видно, что максимальная амплитуда волны в наших начальных условиях составила приблизительно 0.02 м над первоначальным уровнем.

Теперь наложим графики поведения водной поверхности из 10 одинаковых опытов и посмотрим, насколько похожи будут данные. Учитывая то, что поведение воды в одних и тех же условиях может несущественно отличаться, небольшие отличия в данных с датчика не будут приниматься, как ошибки в считывании данных. График поведения волн для 10 одинаковых экспериментов представлен на рис. 4.

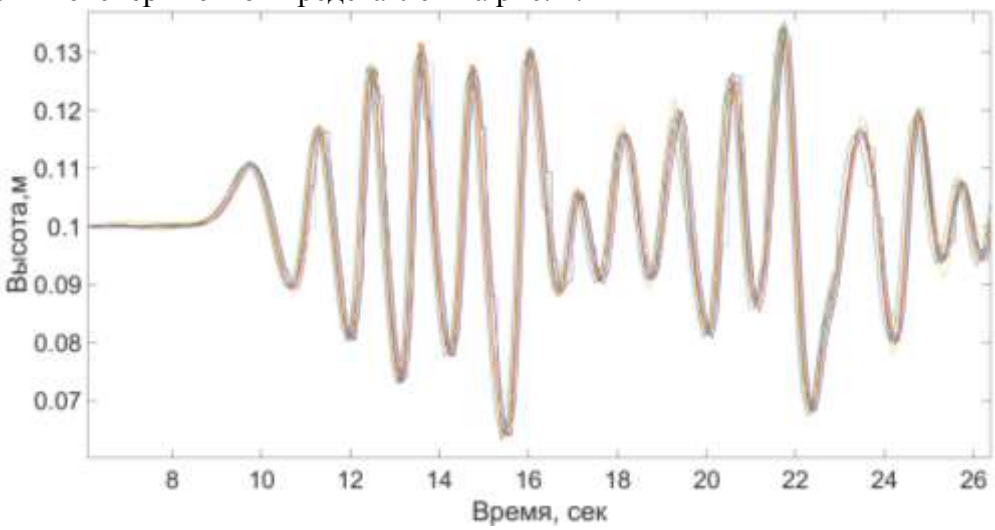


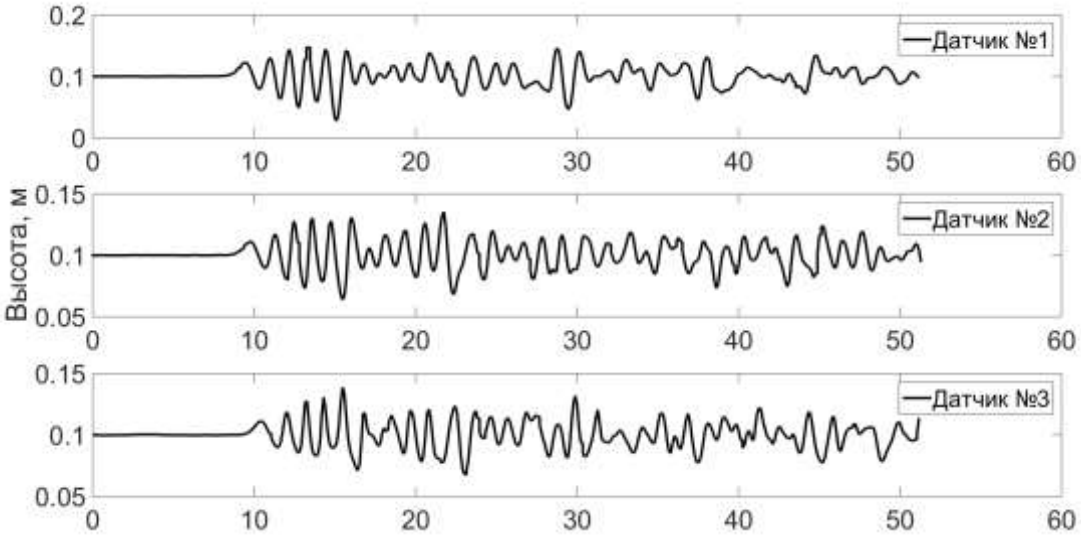

**Рис. 4. Наложение данных из 10 экспериментов, демонстрирующих поведение водной поверхности при движении волнового пакета, представляющего собой пять импульсов с частотой в 1 Гц на расстоянии 3.35 м от волнопродуктора**

На рис. 4 видно, что во всех 10 экспериментах подходящие волновые пакеты имели приблизительно одинаковую амплитуду и форму. Это подтверждает вычисление среднеквадратического отклонения максимальных амплитуд, которое составляет 0.00086 или 0.086%. Максимальная разница между соответствующими амплитудами волн составила 0.0025 м. Кроме того, видно, что отраженные волновые пакеты тоже ведут себя одинаково для всех проведенных опытов.

Система датчиков синхронизирована по времени, поэтому достаточно легко определить временные интервалы, за которые волновой пакет проходит до датчика и обратно, отразившись от стенки бассейна, а также скорость падающих волн. На графике видно, что время, затраченное волновым пакетом на прохождение от датчика до стенки и обратно, составляет приблизительно 15 секунд. За это время волновой пакет преодолел расстояние в 2.95 м.

Программное обеспечение регистратора частот РЧ-24М позволяет записывать показания датчиков в реальном времени независимо друг от друга, начиная запись одновременно, что позволяет определить время прохождения волнового пакета от одного датчика до другого. Кроме того, наличие сразу нескольких донных датчиков позволит отследить поведение волновых пакетов или уединенных волн на каждом интервале канала. При этом программное обеспечение регистратора частот выводит полученный сигнал на монитор в реальном времени и сохраняет данные в формате .xls, однако не имеет инструментов для постобработки данных. В связи с этим был написан скрипт, способный считать данные и построить их в среде Matlab. Благодаря результатам скрипта можно провести визуальный анализ полученных результатов считывания и проводить любые необходимые операции над данными. Скрипт позволяет накладывать друг на друга сигналы, полученные с одного датчика для разных экспериментов, что позволяет отследить различия в поведении волновых пакетов. Также возможно отследить синхронное поведение волн на протяжении всего ступенчатого дна. Рассмотрим сигналы, полученные в одном эксперименте, но на разных датчиках. Результаты представлены на рис. 5.

На рис. 5 видно, что сгенерированный волновой пакет достигает датчиков с разницей во времени. Сигналы представляют собой волновой пакет в одинаковом временном промежутке, записанный различными датчиками. Видно, что чем ближе датчик стоит к краю лабораторной установки, тем хуже он регистрирует отраженную волну. Это связано в первую очередь с тем, что волновой пакет не успевает полностью пройти датчик, и часть волн, еще не дошедших до стенки бассейна, накладывается на те, что уже успели отразиться, образовывая стоячую волну.



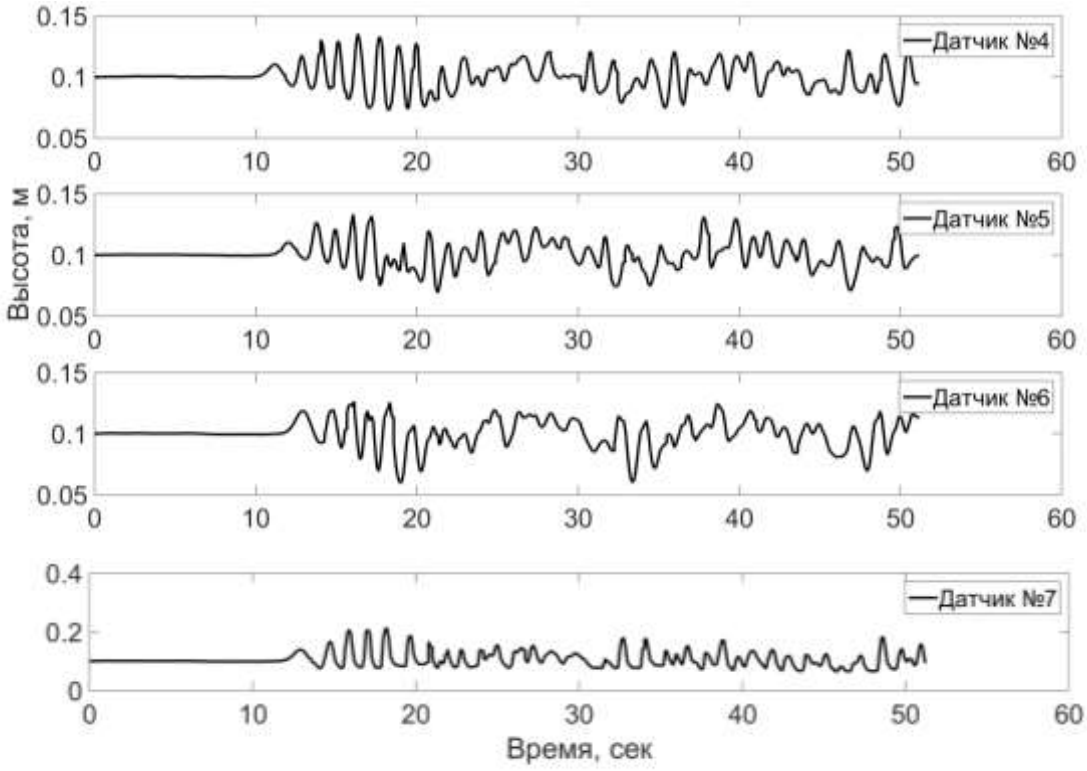



**Рис. 5. Поведение волновых пакетов в рамках одного эксперимента**

## Выводы

Проведены лабораторные эксперименты по генерации поверхностных волн в гидродинамическом бассейне научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф в НГТУ им. Р.Е. Алексеева**.**

Написан скрипт, позволяющий строить полученные сигналы с донных датчиков давления, с помощью которого стало возможным выделение таких волновых характеристик как амплитуда волны, частота, скорость распространения, крутизна, обрушение и т.д.

Проведены эксперименты, целью которых было определение повторяемости моделируемых в лабораторном бассейне волновых процессов. Сделаны оценки повторения сигналов датчиков, расположенных на протяжении всего ступенчатого дна.

Представленные результаты научно-исследовательской работы получены при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-1127.2017.5).

## Список литературы

1. Carrier, G.F., Greenspan, H.P. Water waves of finite amplitude on a sloping beach // J. Fluid Mech. 1958. V. 4. P. 97–109.

2. Диденкулова, И.И. Накат длинных волн на берег: влияние формы подходящей волны / И.И. Диденкулова, Е.Н. Пелиновский // Океанология. 2008. Т. 48. № 1. С. 5–10.

3. Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems, Randall J. LeVeque, Cambridge University Press, 2002.

**N.M. Likhodeev, A.A. Rodin**

## VISUALIZATION OF THE WATER SURFACE BASED ON LABORATORY DATA OBTAINED WITH BOTTOM PRESSURE SENSORS.

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod*

The paper presents a description of laboratory experiments on the generation and propagation of surface waves generated by a wave generator in an experimental wave tank based at the laboratory of Modeling of Natural and Anthropogenic Disasters at the NNSTU n.a. R.E. Alekseev. A method for recording wave characteristics using pressure sensors disposed in a removable bottom profile is described. A software script was developed to visualize the data obtained with the bottom sensor system.

*Keywords*: laboratory experiment, wave packets, surface waves

**Сведения об авторах**

**Лиходеев Никита Михайлович** – студент, Likhodeev.Nikita@yandex.ru.

**Родин Артём Александрович** – к.ф.-м.н., PhD, инженер НИЛ МПиТК, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, xmrarro@gmail.com.

**Куркин Андрей Александрович** – главный научный сотрудник, заведующий кафедрой «Прикладная математика», научный руководитель лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, доктор физико-математических наук, профессор, 8(831)436-63-93, aakurkin@gmail.com.