

УДК 532.5.031;532.593.2;532.593.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НАКЛОННОЙ ПЛАСТИНЫ ПРОТИВ ВОЛН ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

© 2011 г.

А.К. Такмазян<sup>1</sup>, А.Н. Осипова<sup>2</sup>, Е.В. Филатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Инжиниринговая компания «Прогрестех»

takmazian@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2011

Экспериментально исследована зависимость скорости движения тележки с наклонной пластиной, установленной в волновом гидроканале, от параметров волн, а также от глубины погружения, угла наклона и размеров пластины. Обнаружен и теоретически обоснован эффект движения тележки навстречу волнам. С помощью эволюционных систем уравнений приближения Буссинеска для периодических волн над наклонной пластиной получены профили свободной поверхности, соответствующие измеренным. Проведены оценки величины импульса, возникающего в результате обрушения волн.

*Ключевые слова:* идеальная жидкость, потенциальное течение, приближение Буссинеска, обрушение волн, волновой движитель.

В [1] описан принцип использования энергии опрокидывающихся морских волн для движения судов без использования качки корабля. Отбор энергии у волн происходит в отсутствие подвижных элементов в конструкции. Описана модель такого движителя, созданная в НИИ механики МГУ. Она представляет собой пластину, закрепленную по вертикали на малой глубине под свободной поверхностью воды и имеющую небольшой уклон навстречу набегающим волнам. На пластине происходит накат волн на наклонный берег, в процессе которого волны разрушаются. Масса воды, вовлеченной в обрушение, исключается из циклического движения, в котором происходит преобразование кинетической энергии жидкости в потенциальную и обратно, и при падении с высоты гребня приобретает импульс, с которым выносятся за пределы пластины. Таким образом, на вертикальной границе некоторого объема, включающего в себя жидкость и пластину, возникает поток импульса, благодаря чему пластина приобретает противоположно направленную тягу. При определенном заглублении и наклоне пластины горизонтальная составляющая тяги пластины направлена против движения волн. На рис. 1 показан закон движения  $x_T(t)$  тележки с пластиной длиной 500 мм, наклоненной под углом  $36^\circ$  к набегающим волнам, при различных частотах волн: 1 – 1.03, 2 – 0.89, 3 – 0.80, 4 – 0.53 Гц. Верхняя кромка пластины при этом бы-

ла расположена на уровне невозмущенной поверхности жидкости («нулевая кромка»). Из фигуры видно, что процесс во всех случаях переходит в колебательное движение поступательного перемещения с некоторой, зависящей от частоты, скоростью дрейфа.

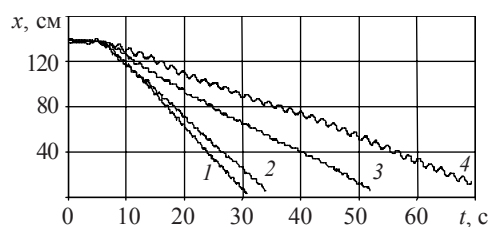


Рис. 1

В эксперименте была исследована зависимость скорости движения тележки с пластиной от параметров волн, а также от глубины погружения, угла наклона и размеров пластины. Обнаружены два механизма воздействия волн на погруженную пластину, первый из которых не связан с опрокидыванием волн. Качественно эффект объяснен с помощью оценки средней за период силы, действующей на пластинку в поле течения волны Герстнера. Эксперименты подтверждают это качественное исследование. Второй механизм имеет место для достаточно длинных пластин при умеренных углах их наклона к набегающим волнам. Показано, что максимум эффекта движения против волн соответствует режиму опрокидывания волн около задней кромки пластины.

Проведены исследования влияния небольшого плоского закрылка на скорость дрейфа. Обнаружено, что угол установки закрылка сильно влияет на скорость дрейфа. При горизонтальном положении закрылка пластина движется против волн со скоростью незначительно большей, чем без закрылка. При отклонении закрылка вверх быстро нарастает скорость движения по волнам.

Использовано приближение Буссинеска для оценки тяги пластины в зависимости от параметров волн, а также от заглубления и угла наклона пластины. В случае наклонного плоского дна такая задача была впервые сформулирована и решена для уединенной волны Д. Перегрином в [2]. В настоящей работе используется система уравнений из [3], в которую в качестве неизвестной функции вводится локальная продольная скорость на определенном уровне между дном и невозмущенной поверхностью. Эта модель дает весьма точные значения дисперсии для волн, длина которых составляет всего лишь две локальные глубины слоя. Для решения системы «предиктор–корректор» Адамса – Бэшфорда – Мултона четвертого порядка по времени с центральными разностями. На рис. 2 приведены полученные решения.

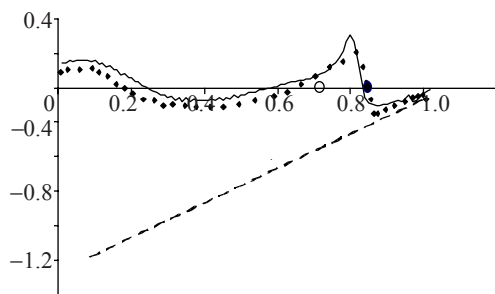


Рис. 2

Сплошной линией показан профиль свободной поверхности жидкости, прерывистой линией – поверхность пластины, обращенная к волне, точками – экспериментально измеренный профиль волны, закрашенным кружком – точка обрушения волны в эксперименте, пустым кружком – теорети-

ческая точка обрушения волны. Угол наклона пластины –  $10.5^\circ$ .

Определение положения точки обрушения производилась, следуя [4], по критерию превышения скорости частиц на поверхности гребня волны фазовой скорости самого гребня. Оценка тяги возникающей струи давалась формулой импульса  $P$  твердого тела массы  $m$ , потенциальная энергия которого  $E$  полностью преобразовалась в кинетическую:  $P = (2Em)^{1/2}$ . В данном случае за  $m$  и  $E$  принимался суммарный по периоду волны поток массы и потенциальной энергии через поверхность, на которой происходит обрушение. Полученные данные для силы тяги пересчитаны на скорость пластины, установленной под углом в бесконечном потоке. Произведена поправка на универсальный для всех размеров пластин и параметров волн коэффициент  $K = 0.2$ , в котором учтено колебательное движение пластины.

Результаты решений по приближенной модели Буссинеска проверены в ходе решения полной системы уравнений Эйлера с помощью известных вычислительных пакетов. Проведены сравнения по координате точки обрушения и величине импульса возникающей струи.

В исследовании принимал участие В.В. Прокофьев.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-08-01087-а).

#### Список литературы

1. Якимов А.Ю., Якимов Ю.Л. Прямоточный волновой движитель судна. // Вестник МГУ. Сер.1. Матем., механ. 2005. № 4. С. 59–62.
2. Peregrine D. Long waves on a beach // J. Fluid Mech. 1967. V. 27. P. 815–827.
3. Nwogu O. An alternative form of the Boussinesq equations for nearshore wave propagation // J. Waterway, Port, Coast. Ocean Engng. 1993. V. 119. P. 618–638.
4. Wei G., Kirby J.T., Grilli S.T., Subramanya R. A. Fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves // J. Fluid Mech. 1995. V. 294. P. 71–92.

## AN EXPERIMENTAL-COMPUTATIONAL MODELLING OF WAVE-INDUCED MOTION OF AN INCLINED PLANE AGAINST WAVES

A.K. Takmazian, A.N. Osipova, E.V. Filatov

A rigid inclined plate was fixed on a rail-trolley and was able to move along a 1.5 x 1.5 m cross-section channel filled with water. Plane periodical progressive waves were produced inside the channel. The effect of the plate moving against waves was observed and measured. A the dependence of the velocity of the plate on the wave parameters and geometry of the plate was studied. Using Boussinesq-type dynamic ODE system, initially introduced by Nwogu, a wave profiles were obtained and compared with the experimentally measured ones, showing close coincidence. Wave-induced plate momentum were estimated.

*Keywords:* ideal fluid, potential flow, Boussinesq approximation, wave breaking, wave-propelled motion.