

ПАРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ГЛУБОКОЙ ВОДЫ

Качулин Д.И.¹, Гелаш А.А.^{1,2}, Дьяченко А.И.³, Захаров В.Е.³

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Россия
e-mail: d.kachulin@gmail.com

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

³Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черногловка, 142432, Россия
Статья поступила в редакцию 25.12.2018, одобрена к печати 30.01.2019

Взаимодействие когерентных структур (различных видов солитонных волновых групп) на поверхности глубокой воды является важным нелинейным волновым процессом, который изучается как теоретически, так и экспериментально (Dyachenko et al., 2013a,b; Slunyaev et al., 2017). На данный момент полное теоретическое описание таких взаимодействий известно только для самой простой модели – нелинейного уравнения Шредингера (НУШ), для которого найдены точные много-солитонные решения.

В работе (Kachulin, Gelash, 2018), была численно исследована динамика парных взаимодействий когерентных структур (бризеров) на поверхности глубокой воды в рамках модели Дьяченко-Захарова. Были выявлены существенные различия в динамике столкновений бризеров компактного уравнения Дьяченко-Захарова, по сравнению с поведением солитонов НУШ.

Обнаружено, что в более точной модели гравитационных поверхностных волн, в отличие от НУШ, величина максимальной амплитуды волны, возникающей при столкновении когерентных структур, может превышать сумму начальных амплитуд бризеров. Кроме того, максимальное усиление амплитуды волнового поля растет с увеличением крутизны взаимодействующих бризеров и уже при крутизне $\mu \approx 0.2$ превышает 1 на 20%. Выявлено, что важным параметром, определяющим динамику парных столкновений бризеров, является относительная фаза этих объектов в момент взаимодействия. Так, например, взаимодействия бризеров в неинтегрируемой модели Дьяченко-Захарова приводят к появлению небольшого излучения, что было обнаружено ранее в 2013 г. (Dyachenko et al., 2013a,b). Теперь нам удалось показать, что величина потерь энергии сталкивающихся солитонов на излучение также зависит от их относительной фазы. Максимальные потери энергии наблюдаются при той же относительной фазе, при которой наблюдается максимум усиления амплитуды. Кроме того, в зависимости от значения относительной фазы, солитоны могут как забирать, так и отдавать энергию, что приводит к увеличению или уменьшению их амплитуды после столкновения. Также нами обнаружено, что в отличие от модели НУШ, пространственные сдвиги солитонов в более точной модели могут быть как положительными, так и отрицательными.

Использование точных бризерных решений приближенной модели Дьяченко-Захарова и канонического преобразования к физическим переменным – профилю

свободной поверхности и потенциалу на поверхности жидкости – позволили найти приближенные решения в виде бризеров в рамках точных нелинейных уравнений для потенциальных течений несжимаемой жидкости. Предварительные результаты численных экспериментов в точной модели показали схожую динамику взаимодействия бризеров, что говорит о том, что представленная нами теоретическая картина взаимодействия когерентных структур является общей и может наблюдаться в эксперименте.

Исследование динамики парных взаимодействий бризеров в точной модели выполнено Д.И. Качулиным за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-00079). Работа В.Е. Захарова и А.И. Дьяченко (исследование взаимодействий бризеров в рамках приближенных моделей) поддержана госзаданием по теме «Динамика сложных сред».

Ключевые слова: нелинейные волны, солитон, бризер, волны-убийцы, гравитационные поверхностные волны, уравнение Дьяченко-Захарова, нелинейное уравнение Шредингера

Литература

- Dyachenko A.I., Kachulin D.I., Zakharov V.E.* On the Nonintegrability of the Free Surface Hydrodynamics // JETP Letters. 2013a. Vol. 98. No. 1. P. 43–47.
- Dyachenko A.I., Kachulin D.I., Zakharov V.E.* Collisions of two breathers at the surface of deep water // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2013b. Vol. 13. P. 3205–3210.
- Kachulin D., Gelash A.* On the phase dependence of the soliton collisions in the Dyachenko–Zakharov envelope equation // Nonlin. Processes Geophys. 2018. Vol. 25. P. 553–563.
- Slunyaev A., Klein M., Clauss G.* Laboratory and numerical study of intense envelope solitons of water waves: Generation, reflection from a wall, and collisions // Phys. Fluids. 2017. Vol. 29. P. 047103.

PAIRWISE INTERACTIONS OF COHERENT STRUCTURES ON THE SURFACE OF DEEP WATER

Kachulin D.I.¹, Gelash A.A.^{1,2}, Dyachenko A.I.³, Zakharov V.E.³

¹*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russia*
e-mail: d.kachulin@gmail.com

²*Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia*

³*Landau Institute for Theoretical Physics RAS, Chernogolovka, 142432, Russia*
Submitted 25.12.2018, accepted 30.01.2019

The interactions of coherent structures (different types of solitary wave groups) on the surface of deep water is an important nonlinear wave process, which has been studied both theoretically and experimentally (Dyachenko et al., 2013a, b; Slunyaev et al., 2017). At the moment, a complete theoretical description of such interactions is known only for the simplest model – the nonlinear Schrödinger equation (NSE) where exact multi-soliton solutions are found.

In the work (Kachulin, Gelash, 2018), the dynamics of pairwise interactions of coherent structures (breathers) on the surface of deep water were numerically investigated in the framework of the Dyachenko-Zakharov model. Significant differences were found

in the collision dynamics of breathers of the compact Dyachenko-Zakharov equation when compared to the behavior of the NLSE solitons.

It was found that in a more precise model of gravitational surface waves, in contrast to the NLSE, the maximum amplification of the wave field amplitude during the collision process of coherent structures can exceed the sum of the initial amplitudes of the breathers. In addition, the maximum amplification of the wave field amplitude increases with increasing steepness of the interacting breathers and exceeds unity by 20% at the value of the wave steepness $\mu \approx 0.2$. It was revealed that an important parameter determining the dynamics of pairwise collisions of breathers is the relative phase of these objects at the moment of interaction. The interaction of breathers in the non-integrable Dyachenko-Zakharov model leads to the appearance of small radiation, which was discovered earlier in 2013 (Dyachenko et al., 2013a, b). In the work (Kachulin, Gelash, 2018) we demonstrate that the magnitude of the energy losses of the colliding solitons to radiation also depends on their relative phase. Maximum of the energy losses is observed at the same relative phase, at which the amplitude amplification maximum is observed. In addition, depending on the value of the relative phase, solitons can both gain and lose the energy, which results in increase or decrease of their amplitude after a collision. It was found that, in contrast to the NSE model, the spatial shifts of solitons in a more precise model can be both positive and negative.

We use the exact breather solutions of the Dyachenko-Zakharov model and the canonical transformation to physical variables (the free surface profile and the potential on the liquid surface) to find approximate solutions in the form of breathers within the framework of exact nonlinear equations for potential incompressible fluid flows. The preliminary results of our numerical experiments in the exact model demonstrate similar dynamics of the interaction of breathers, which indicates that the theoretical picture of the interaction of coherent structures presented here is universal and can be observed in laboratory experiments.

The study of the dynamics of breather interactions in the exact model performed by D.I. Kachulin was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 18-71-00079). The work of V.E. Zakharov and A.I. Dyachenko on the dynamics of breather interactions in approximate models was supported by the state assignment “Dynamics of the complex materials”.

Keywords: nonlinear waves, soliton, breather, freak-waves, surface gravity waves, Dyachenko-Zakharov equation, nonlinear Schrödinger equation

References

- Dyachenko A.I., Kachulin D.I., and Zakharov V.E. On the Nonintegrability of the Free Surface Hydrodynamics. *JETP Letters*, 2013a, Vol. 98, No. 1, pp. 43–47.
- Dyachenko A.I., Kachulin D.I., and Zakharov V.E. Collisions of two breathers at the surface of deep water. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2013b, Vol. 13, pp. 3205–3210.
- Kachulin D. and Gelash A. On the phase dependence of the soliton collisions in the Dyachenko–Zakharov envelope equation. *Nonlin. Processes Geophys.*, 2018, Vol. 25, pp. 553–563.
- Slunyaev A., Klein M., and Clauss G. Laboratory and numerical study of intense envelope solitons of water waves: Generation, reflection from a wall, and collisions. *Phys. Fluids*, 2017, Vol. 29, pp. 047103.