

О ПЕРЕНОСЕ ЧАСТИЦ СРЕДЫ СОЛИТОНАМИ И НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЛНАМИ

Н. В. Герасименко, Ф. М. Трухачев, М. С. Щуро

Белорусско-Российский университет,
г. Могилев, Республика Беларусь

Представлено обобщение цикла работ, посвященных изучению механизма переноса частиц среды нелинейными волнами различной физической природы. Показано, что наряду с классическим явлением нелинейного дрейфа частиц (дрейф Стокса) существует солитонный механизм переноса частиц, которым нельзя пренебречь даже при малых амплитудах волны.

Исторически исследование нелинейных волн началось с задач гидродинамики. Свойство таких волн переносить вещество в направлении своего распространения было впервые предсказано Дж. Стоксом [1] и впоследствии было названо «дрейф Стокса». Наиболее активно данное явление изучается в приложениях физики океана и вод суши как один из наиболее существенных механизмов переноса различных загрязнителей техногенного и природного происхождения [2]. Можно продемонстрировать (см. например, [2, 3]), что дистанция переноса частиц среды по механизму дрейфа Стокса квадратично зависит от амплитуды волны. Действительно, пусть эйлерова скорость частицы жидкости (или плазмы) описывается простейшим законом $v(x,t) = A \sin(kx - \omega t)$ (где k – волновое число, ω – частота колебаний), в лагранжевом представлении имеем

$$\frac{dx}{dt} = A \sin(kx - \omega t),$$

решение полученного нелинейного дифференциального уравнения (например, с помощью теории возмущений) позволяет выразить дистанцию переноса частицы среды как функцию амплитуды (своебразный «эффект второго порядка», упоминание которого также можно найти в классическом учебном пособии [4]):

$$\Delta X_{\text{Stokes}} \propto \frac{kA^2}{2\omega}.$$

Нетрудно видеть, что дистанция переноса довольно быстро уменьшается с уменьшением амплитуды, а в приближении малых амплитуд вовсе становится неразличимо малой. Ряд исследований также показывает, что солитоны, как и другие нелинейные волны, способны переносить частицы среды в направлении своего распространения. В [5] авторы впервые предложили новый физический механизм (наряду с течениями, вызванными ветрами) переноса частиц живой материи с внутренними солитонами в океанах.

Солитоны также активно изучаются в плазме, в нелинейных волноведущих структурах и других физических системах. В течение ряда лет под руководством Трухачева Ф. М. был выполнен цикл исследований, в результате которых установлены новые свойства солитонов в плазме и жидкостях. В работах [6, 7, 8] представлены результаты исследований переноса частиц среды солитонами ионно-акустического типа, а также солитонами на поверхности жидкости. В частности показано, что в отличие от классического дрейфа Стокса, дистанция переноса частиц для солитонов, описываемых уравнением Кортевега – де Фриза (КдФ) пропорциональна корню квадратному амплитуды волны $\Delta X_{\text{Soliton}} \propto \sqrt{A}$. На рисунке 1 представлен сравнительный анализ $\Delta X(A)$, обусловленный дрейфом Стокса и солитонами. Можно видеть, что в отличие от дрейфа Стокса, переносом частиц среды, вызванным солитонами, нельзя пренебречь даже для волн малой амплитуды (заштрихованная область на рисунке 1). Это говорит о том, что такой механизм может играть существенную роль в процессах переноса загрязнителей в водах океана, заряженных частиц в космической плазме и других физических системах, а также является неотъемлемым свойством солитонов как разновидности нелинейных волн.

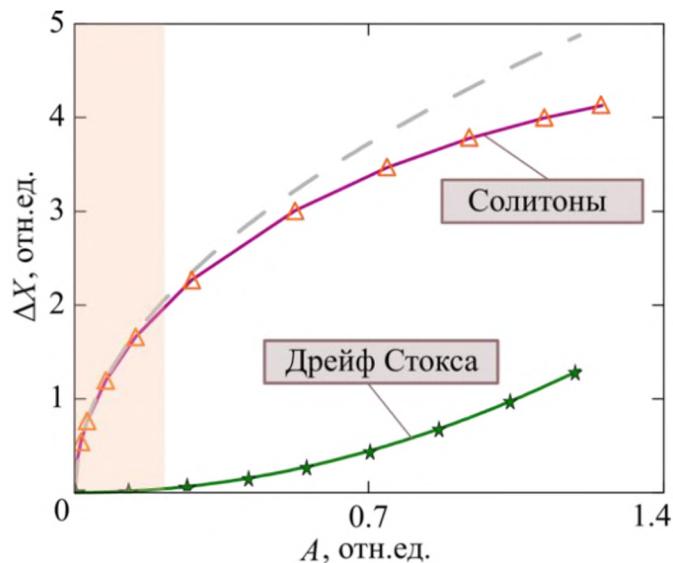


Рисунок 1 – Зависимость дистанции переноса частиц среды $\Delta X(A)$ от амплитуды волны

Литература

1. Stokes, G. G. On the theory of oscillatory waves / G. G. Stokes // Trans. Cam. Philos. Soc. – 1847. – T. 8. – C. 441–455.
2. Van Den Bremer, T. S. Stokes drift / T. S. Van Den Bremer, Ø.Breivik // Philosophical transactions of the royal society a: mathematical, physical and engineering sciences. – 2018. – Vol. 376. – № 2111. – P. 20170104.
3. Falkovich, G. Fluid mechanics: A short course for physicists / G. Falkovich. – Cambridge : Cambridge University Press, 2011. – 167 p.
4. Теоретическая физика : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – Т. VI : Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд., перераб. – 736 с.
5. Lamb, K. G. Particle transport by nonbreaking, solitary internal waves / K. G. Lamb // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1997. – Vol. 102. – № C8. – P. 18641–18660.
6. Matter transport as fundamental property of acoustic solitons in plasma / F. M. Trukhachev, N. V. Gerasimenko, M. M. Vasiliev, O. F. Petrov // Physics of Plasmas. – 2023. – Vol. 30. – № 11. – P. 112302.

7. Unidirectional transport of ions and perturbation of plasma distribution functions by ion-acoustic solitons: Numerical simulation and analytical solution / F. M. Trukhachev, N. V. Gerasimenko, M. M. Vasiliev, O. F. Petrov // Physics of Plasmas. – 2023. – Vol. 30. – № 2. – P. 022113.

8. Matter Transport as Fundamental Property of KdV Solitons in Shallow Water / F. M. Trukhachev, N. V. Gerasimenko, M. M. Vasiliev, O. F. Petrov // // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2024. – Vol. 27. – № 4. – C. 398–403.