



## Уединенные волны в многослойной стратифицированной жидкости<sup>1</sup>

Ермишина В.Е., Ляпидевский В.Ю., Чесноков А.А.

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Уединенные внутренние волны часто встречаются в океанических и прибрежных течениях. Характерная особенность внутренних волн, обуславливающая интерес к их исследованию, состоит в том, что амплитуда уединенной волны может существенно превышать начальную толщину одного из слоев, вдоль границы которых распространяется волна. При моделировании внутренних волн обычно используются уравнения типа Грина–Нагди, содержащие производные высоких порядков. Однако, при численном моделировании расчеты занимают достаточно длительное время и постановка неотражающих граничных условий может быть достаточно сложна.

В работе предложена одномерная модель законов сохранения первого порядка, описывающая распространение внутренних уединенных волн на многослойном стратифицированном мелководье в стратифицированной мелкой воде с негидростатическим распределением давления в двух внешних слоях и произвольным числом внутренних гидро-

статических слоев. Построение этой модели основано на использовании дополнительных переменных, позволяющих аппроксимировать дисперсионные уравнения типа Грина–Нагди системой первого порядка. В приближении Буссинеска основные уравнения позволяют моделировать распространение нелинейных внутренних волн с учетом тонкой стратификации плотности, слабого сдвига скорости в слоях и неровного рельефа. Численные расчеты генерации и распространения внутренних волн большой амплитуды проводятся как с использованием предложенной системы первого порядка, так и с использованием уравнений типа Грина–Нагди. Установлено, что решения этих моделей практически совпадают. Преимуществом уравнений первого порядка является простота численной реализации и значительное сокращение времени расчета. Показано, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными по эволюции уединенных волн моды 2 в резервуарах постоянной и переменной высоты.

Также для полученной модели проведено построение стационарных солитоноподобных решений, в виде симметричных и несимметричных волн моды 2, примыкающих к заданному многослойному постоянному потоку. Построенные решения верны для произвольного количества слоев с гидростатическим распределением давления, что

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 23-41-00090).

позволяет учесть тонкую стратификацию в слоях. Получение таких решений возможно при задании таких данных Коши, выбор которых определяется анализом асимптотического поведения решения. Солитоноподобные решения строились в предположении слабого сдвига скоростей в слоях, далее исследовались условия существования данных решений в случае произвольного сдвига скоростей.

Для простоты исследование условий существования решения в форме уединенной волны для уравнений динамики длинных волн проводилось для двухслойного стратифицированного течения в приближении Буссинеска с негидростатически распределенным давлением в одном или обоих слоях. В терминах условий гиперболичности модели без учета негидростатической поправки давления сформулированы ограничения на сдвиг скорости в слоях. Далее получены ОДУ, определяющие профиль уединенной волны в зависимости от двух безразмерных параметров (чисел Фруда), связанных

со скоростью волны и сдвигом скорости в слоях для невозмущенного потока. В плоскости чисел Фруда определена область параметров, для которой возможно построение решения в форме уединенной волны. Приведены примеры профилей уединенных волн в сдвиговом двухслойном потоке и выполнено сопоставление моделей, показывающее влияние упрощающих предположений (гидростатичность одного из слоев, линеаризация дисперсионных членов) на форму волны. Полученные условия существования можно распространить на случай трехслойного течения, симметричного относительно средней линии, тогда модель будет применима для описания симметричных волн второй моды.

### Список литературы

- [1] Chesnokov A. A., Ermishina V. E., Liapidevskii V. Y. Strongly non-linear Boussinesq-type model of the dynamics of internal solitary waves propagating in a multilayer stratified fluid // *Physics of Fluids*. 2023. 35(7).