

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИДОННОГО ДАВЛЕНИЯ И ПРИДОННЫХ СКОРОСТЕЙ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ИНТЕНСИВНЫХ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Рувинская Е.А., Куркина О.Е., Куркин А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия

e.rowinskaya@gmail.com

Ключевые слова: детектирование внутренних волн, формула Морисона, солитоны

Интенсивные внутренние гравитационные волны, составляющие основу нелинейных волновых движений в стратифицированном океане, являются одной из наиболее серьезных угроз, ставящих под вопрос безопасность гидротехнических сооружений на континентальном шельфе. Скорости, индуцированные внутренними волнами, могут создавать существенные локальные нагрузки и изгибающие моменты, представляющие опасность для нефтяных платформ и буровых установок. Опасность таких волн признается критической, поэтому, подобно системе оповещения о цунами, обсуждается необходимость использования систем детектирования солитонов внутренних волн большой амплитуды. Такие системы активно создаются и тестируются для обеспечения безопасности буровых платформ. Одним из способов, широко применяемых для регистрации интенсивных волн, является установка донных датчиков давления, использование которых также способствует оперативному обнаружению внутренних солитонов больших амплитуд. Однако, для детектирования внутренних волн необходимо определить связь вариаций донного давления не со смещениями свободной поверхности, как это делается для поверхностных волн, а с вариациями пикноклина, которые значительны при распространении таких волн.

В настоящей работе для получения формул связи придонного давления и вариаций уровня пикноклина используются линеаризованные уравнения Эйлера для несжимаемой стратифицированной жидкости, дополненные граничными условиями на дне («непротекания») и поверхности жидкости («твердая крышка»). Из уравнений исключена постоянная гидростатическая компонента давления. Используя разделение переменных на вертикальную «модовую» составляющую и гармоническую $x-t$ составляющую скоростей (например, $u(x,z,t) = U(z)\exp[i(\omega t - kx)]$) для волн малых амплитуд, можно получить краевую задачу для определения модовой функции вертикальной скорости. При этом вертикальная структура смещения пикноклина остается такой же, как и в поле вертикальной скорости. Показано, что поле давления в длинной внутренней волне синфазно полю горизонтальной скорости. В результате было получено, что флуктуации давления также синфазны с колебаниями пикноклина, но их вертикальная структура не повторяет структуру смещений изопикн стратифицированного океана. Выведена формула, связывающая вариации донного давления с вариациями пикноклина, хорошо измеряемыми и достигающими в наблюдениях нескольких десятков метров. Из уравнения неразрывности и кинематического граничного условия на пикноклине рассчитаны придонные вариации скорости течения, вызванные внутренними волнами. Они, как и ожидалось, синфазны внутренним волнам, поэтому течения направлены в сторону распространения под гребнем внутренней волны и в противоположную сторону - под ее впадиной.

Сравнение абсолютных значений вариаций придонного давления в линейном приближении, вызванных действием поверхностных и внутренних волн, показывает, что вклад последних едва ли будет заметен даже на фоне поверхностного волнения много меньшей амплитуды. Так, например, для двухслойной жидкости отношение амплитуд поверхностной и внутренней волны, вызывающих одинаковое изменение придонного давления, пропорционально отношению $(h\Delta q_0)/(Hq_0) \ll 1$, где h - толщина верхнего слоя, H - глубина бассейна, $\Delta q_0/q_0$ - относительная величина скачка плотности на пикноклине. Для придонных скоростей в линейном приближении отношение амплитуд поверхностной волны на «мелкой воде» и внутренней волны в двухслойной жидкости, индуцирующих одинаковые по абсолютному значению потоки, определяется выражением $\sqrt{h/(H-h)} \cdot \sqrt{\Delta q_0/q_0}$. Очевидно, что в условиях природных водоемов это отношение будет также меньше единицы в силу того, что второй множитель обычно имеет порядок 10^{-1} , а первый множитель - квадратный корень из отношения толщины верхнего и нижнего слоя, как правило, меньше единицы. Однако, ветровые поверхностные волны - это короткие волны, либо волны умеренной длины: их абсолютные значения придонных скоростей стремятся к нулю (из-за экспоненциального затухания возмущений с глубиной волновой слой примерно равен половине длины волны), тогда как внутренние волны индуцируют поток, в двухслойной жидкости определяющийся выражением $cA(x,t)/(H-h)$, где c - фазовая скорость внутренних волн, а $A(x,t)$ - профиль внутренней волны в максимуме линейной моды. Поэтому на фоне ветрового поверхностного волнения вклад внутренних волн в придонные скорости значителен.

Необходимо отметить, что при обтекании подводных конструкций потоком, индуцированным внутренними гравитационными волнами, интенсивность давления на боковую поверхность гидротехнических сооружений, как правило, вычисляется приближенно по формуле Морисона [Ньюман, 1985; Алешков, 1990; Халфин, 1990]. В рамках этого подхода давление потока содержит инерционную (линейную, зависящую от ускорения частиц жидкости в волне) и скоростную (нелинейная сила сопротивления, квадратичная по скорости потока) составляющие. В связи с этим представляется интересным оценить нелинейные поправки к давлению во внутренних волнах в случае непрерывной стратификации и модельных случаев распределения плотности (для двухслойного потока с учетом поверхностного натяжения между слоями такое приближение уже выведено в работах [Куркин и др., 2013; Гиниятуллин и др., 2014; Kurkina et al., 2015]).

Представленные результаты получены при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов на 2016-2018 гг. (СП-2311.2016.5).

Список литературы

- 1) Ньюмен, Дж. Морская гидродинамика/Дж. Ньюмен – Л.: Судостроение, 1985. – 368 с.
- 2) Халфин, И.Ш. Воздействие волн на морские нефтегазопромысловые сооружения/ И.Ш. Халфин – М.: Недра, 1990. – 368 с.
- 3) Алешков, Ю. З. Теория взаимодействия волн с преградами/ Ю. З. Алешков – Изд-во Ленингр. ун-та, 1990. – 372 с.
- 4) Куркин, А.А. Внутренние волны на границе раздела двухслойной жидкости. Специальные случаи/ Куркин, А.А., Куркина О.Е., Рувинская Е.А., Степанянц Ю.А./ Экологические системы и приборы. – 2013. – № 10. – с. 42 – 49.
- 5) Гиниятуллин, А.Р. Обобщённое уравнение Кортевега – де Вриза для внутренних волн в двухслойной жидкости/ Гиниятуллин А.Р., Куркин А.А., Куркина О.Е., Степанянц

Ю.А.// *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2014. – Т. 7. – № 4. – с. 16-28.

- 6) Kurkina, O. Structure of internal solitary waves in two-layer fluid at near-critical situation/ O. Kurkina, O. N. Singh and Y. Stepanyants// *Communications in Nonlinear Science and Numerical Modeling*. – 2015. – Vol. 22. – P. 1235–1242.