

**ВОЛНЫ-УБИЙЦЫ: ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ****Якубайлик Ю.О.****научный руководитель д-р техн. наук, проф. Симонов К.В.*****Сибирский федеральный университет***

Волны, которые обычно наблюдаем на море – гравитационные волны, возникшие под действием ветра. На больших дистанциях или в штормовых областях ветер создает наиболее интенсивные волны, которые затем могут убегать из зоны генерации, несколько изменяясь (трансформируясь) из-за различного закона ослабления волн разной длины, такие волны называются зыбью.

Кроме интенсивности, которая характеризуется высотой волны  $H$  – расстоянием по вертикали от дна ложбины до пика гребня, важна также длина волны  $l$ . Отношение этих двух величин для индивидуальной волны задает ее крутизну  $K$ :

$$K = \pi \left( \frac{H}{l} \right). \quad (1)$$

Из теории длина волны связана с периодом  $T$  через дисперсионное соотношение, для гравитационных свободных волн помимо величины ускорения свободного падения  $g$  входит зависимость от глубины моря  $D$ :

$$\omega = \sqrt{kg t_n(kD)}, \quad \omega = 2\pi T^{-1}, \quad k = 2\pi\lambda^{-1}. \quad (2)$$

Известно, что типичная крутизна морских волн составляет 0.07-0.1. Нетрудно видеть, что для волн на глубокой воде ( $kD \gg 1$ ) с периодом 10-12 с это соответствует высоте 3.5-7 м. Такой период волн характерен для хорошо развитого волнения, волны с меньшим периодом оказываются ниже по высоте.

Обрушивающимися в приведенном примере становятся 20-30-метровые волны, которые в отечественной литературе называют «волнами убийцами». Следовательно, наиболее существенную роль в исследуемом волновом процессе играет значительная высота волны  $H_s$ . В рамках классической статистической модели вероятность высот волн задается распределением Рэлея:

$$P(H) \sim \exp\left(\frac{-2H^2}{H_s^2}\right). \quad (3)$$

Из публикаций известны наблюдения проявлений изучаемых катастрофических волн. За период 1969-1994 гг. 22 супертанкера были потеряны или существенно повреждены в Тихом и Атлантическом океанах, при этом погибло 525 человек. Как минимум 12 схожих случаев известны для Индийского океана около побережья Южной Африки. Обработка немецким аэрокосмическим центром наблюдений морской поверхности с Европейского космического спутника показывает, что наиболее интенсивные волны наблюдаются на больших акваториях, где разгон волн и способность ветра передавать энергию волнам велики. Наиболее интересны случаи внезапного возникновения высоких волн, значительно превосходящих окружающие.

Известная запись такой волны сделана у побережья г. Геленджика в Черном море и демонстрирует максимально известное усиление волны по отношению к среднему уровню. Если в формулу (3) подставить  $H = 3H_s$ , получим, что такая волна (для характерного периода ветровых волн 10 с) может наблюдаться один раз в 20 лет. Тем не менее, за трехнедельное наблюдение морской поверхности из космоса наблюдалось усиление  $A = 2.9$ ; за 793 ч наблюдений волн в Северном море зарегистрировано  $A = 3.19$ . Столь неожиданно частая регистрация экстремальных волн привела к серьезному пересмотру классической статистической модели в области высоких волн.

Изучаемая волна не просто большая, а именно внезапно большая. Она разительно выделяется из предшествующих и следующих за ней волн по высоте и форме, хотя ее длительность остается типичной для записи ветровых волн. Именно этот факт умножает ее губительность для окружающих объектов. Поскольку многие параметры волн-убийц остаются неизвестными, само их определение оказывается довольно расплывчатым.

Чаще всего пользуются амплитудным критерием выделения аномально высоких волн:  $A > 2$ . Конечная цель исследований волн-убийц – определение их параметров и разработка методов прогноза. Если не использовать многие традиционные упрощения, то волны на морской поверхности оказываются достаточно сложной системой: это трехмерный объект, включающий границу двух сред с потоками (ветром и течениями) и определенной долей перемешивания.

Волны, согласно (2), обладают дисперсией групповой скорости  $c_{gr}(k)=dw/dk$  и они нелинейные. В слишком огрубленных моделях могут теряться эффекты, обуславливающие явление волн-убийц. Наиболее просты и интуитивно понятны линейные модели. Волны на воде несут в себе энергию тем большую, чем выше волны. Потому естественно ожидать, что процессы различного рода фокусировки волновой энергии могут порождать очень высокие волны.

Еще один вариант – это собрать волны вместе из-за разницы в скорости распространения индивидуальных волн. Анализ и определения текущей групповой скорости в 20-минутной выборке поверхностных волн показывает, как резко ее величина изменяется внутри записи. Такая неоднородность приводит к постоянному схождению-расхождению волн и в принципе способна обеспечивать их сильный рост.

Известны исследования по лабораторному моделированию фокусировки волн в результате действия дисперсии. Создаваемый волнопродуктором цуг волн соответствует случаю, когда длинные (более быстрые) волны расположены позади коротких, а закон модуляции частоты волн подобран таким образом, чтобы их схождение было максимальным. Скорость волн зависит от глубины (см. (2)), поэтому волны с более глубоких областей догоняют волны на мелководье, а волновой фронт вытягивается вдоль береговой линии.

Волны малой амплитуды слабо взаимодействуют, оставаясь почти линейными. Поэтому быстрый процесс роста волн оказывается слабо чувствительным к «зашумлению» модулированного цуга другими волнами. Результаты численного моделирования также показывают фокусировку волн в присутствии сильной случайной компоненты для случая двух координат  $x$  и  $y$ . И тогда простая линейная модель зачастую удовлетворительно описывает эту динамику.

В простейшей модели поведение волн описывается с помощью модифицированного дисперсионного соотношения (2) с учетом переменного течения и закона энергетического баланса – уравнения волнового действия. Поставленную задачу можно наглядно интерпретировать, имея ввиду представления потенциальной ямы. Запишем групповую скорость в приближении глубокой воды:

$$c_{gr} = \frac{dw}{dk} = \frac{1\sqrt{g}}{2k} + U. \quad (4)$$

Неоднородное течение  $U(x)$  здесь играет роль потенциальной ямы, вернее – наклонного барьера. Таким образом, морским волнам свойственна нелинейная динамика, ярким примером которой служит их обрушение. Чтобы понять происхождение эффектов нелинейности, достаточно осознать, что бегущая волна сама изменяет условия распространения, и чем она интенсивнее, тем значительнее это влияние. Возникают принципиально новые – нелинейные механизмы генерации очень высоких волн.