

Академик В. В. ШУЛЕЙКИН

ПОВЕДЕНИЕ ЗЫБИ ПРИ ВСТРЕЧНОМ ВЕТРЕ

Общеизвестно, что смена направления ветра на прямо противоположное влечет за собой быстрое гашение зыби, оставшейся после первоначального ветра. Рассмотрим здесь закон убывания высоты волн и исследуем вопрос о том, как должна при этом вести себя длина волн. Воспользуемся теоретическими соображениями, высказанными в наших предыдущих работах: о внутреннем механизме питания волн энергией ветра ⁽¹⁾, о законе нарастания длины волн под действием ветра ⁽²⁾, о происхождении устойчивой мертвой зыби ⁽³⁾.

Пусть в момент прекращения первоначального ветра высота волн достигала $h_1 = 2r_1$, где r_1 — достигнутое значение радиуса орбиты поверхностных частиц воды; длина волн пусть достигла $\lambda_1 = 2\pi R_1$, где R_1 — достигнутое значение радиуса круга кручения. Примем этот момент внезапного изменения направления ветра за начало отсчета времен.

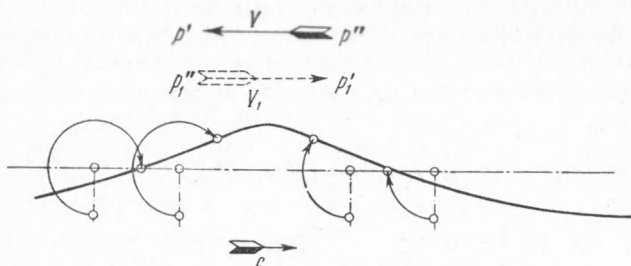


Рис. 1

На рис. 1 изображено изменение картины обтекания волн ветром, возникшее в этот момент времени. Стрелка, поставленная снизу, обозначает неизменное направление движения волн с фазовой скоростью c . Стрелка V_1 — ветер, работавший до момента смены направлений. Стрелка V — новое направление ветра, скорость которого может отличаться от первоначальной также и по величине. p'' , p' — давление воздуха с наветренной стороны, p_1 , p' — давление с подветренной, причем, как известно ⁽¹⁾, всегда $p'' > p'$. Стрелки-дужки изображают фазу орбитального движения водных частиц в той или иной точке склона волн, отсчитываемую от самого нижнего положения частицы на орбите.

Совершенно очевидно, что после смены ветра повышенное давление будет действовать на частицы воды в восходящей части орбиты, а пониженное — в нисходящей части. Следовательно, вместо своего рода «нагнетания энергии» волн под действием ветра, описанного в ⁽¹⁾, здесь должно происходить своего рода «выкачивание энергии», ведущее к гашению волн. В отличие от случая ⁽³⁾, это «выкачивание» будет обусловлено не скоростью c , а суммарной скоростью $V + c$ ветра от-

носителем зыби, бегущей ему навстречу. В наиболее интересных случаях встречный ветер образует на поверхности зыби мелкие волны высоких порядков. Поэтому, в отличие от (3), придется применять для вычислений отнимаемой мощности W_v не теоретическую формулу, а эмпирическую — учитывающую действие мелких волн на воздушный поток.

В итоге выражение для отрицательной мощности, уносимой с единицы поверхности моря, придется сейчас записать так:

$$W_v = -Ar(V+c)^2. \quad (1)$$

Уравнение баланса энергии E , приходящейся на единицу поверхности моря, запишем в форме:

$$\frac{dE}{dt} = \delta g r \frac{dr}{dt} = -Ar(V+c)^2 - 4q_1 r^2, \quad (2)$$

или, после деления всех членов на $\delta g r$:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{A}{g\delta}(V+c)^2 - \frac{4q_1}{\delta g}r. \quad (3)$$

Здесь q_1 зависит от турбулентной вязкости воды.

Интеграл этого уравнения выражает закон убывания полувысоты волн во времени:

$$r = r_1 e^{-\frac{4q_1}{\delta g}t} - \frac{A}{4q_1}(V+c)^2 \left[1 - e^{-\frac{4q_1}{\delta g}t} \right]. \quad (4)$$

В наиболее интересных случаях — при не слишком слабом встречном ветре — второй член правой части дифференциального уравнения (3) пренебрежимо мал по сравнению с первым. Поэтому вместо (4) можно удовлетвориться достаточно надежным и очень удобным для исследования выражением

$$r = r_1 - \frac{A}{\delta g}(V+c)^2 t. \quad (5)$$

Отсюда определится срок Δt , достаточный для полного гашения зыби, если в (5) подставим $r=0$:

$$\Delta t = \frac{\delta g r_1}{A(V+c)^2}. \quad (6)$$

Результаты вычислений по (6) хорошо совпадают с наблюдениями в природной обстановке.

Посмотрим теперь, как ведет себя длина волн. По примеру (2) обратимся к теореме о моменте количества движения водных масс $\bar{Q}$ и моменте внешних сил $\bar{M}$.

Сама величина $\bar{M}$ теперь выразится аналогично (11) из работы (2), но с соответственно измененными знаками:

$$\bar{M} = -Ar \frac{R}{c}(V+c)^2. \quad (7)$$

В таком же роде изменится и выражение (13) из цитированной работы, полученное на основании теоремы о моменте количества движения:

$$\frac{dR}{dt} + 4 \frac{R}{r} \frac{dr}{dt} + 4 \frac{A}{\delta g}(V+c)^2 = 0. \quad (8)$$

Подставим сюда вместо производной dr/dt ее выражение (3). Тогда в получившемся уравнении взаимно уничтожаются два члена, и в результате окажется, что

$$\frac{dR}{dt} = 16 \frac{q_1}{\delta g} R. \quad (9)$$

Отсюда следует

$$R = R_1 e^{16 \frac{q_1}{\delta g} t}. \quad (10)$$

Во всех практически интересных случаях величина $q_1/\delta g$ столь мала, что за промежуток Δt полного гашения зыби R не успевает сколько-нибудь заметно возрасти по сравнению с R_1 . Значит, практически можно считать, что до полного гашения зыби длина волн остается постоянной — той самой, какой ее застала смена ветра.

Решенную задачу легко обобщить применительно к любому направлению ветра, вступившего на смену прежнему.

Если новое направление перпендикулярно к прежнему, то задача не представляет никакого интереса с принципиальной точки зрения: тут будет возникать своеобразная решетка волн, причем образование волн новой системы пойдет приблизительно так же, как шло образование волн на гладкой поверхности воды (¹, ²).

Если новое направление дает составляющую, противоположную старому направлению, то рассуждения настоящей статьи остаются в силе применительно именно к этой составляющей.

Если новое направление дает составляющую, однозначную с прежним направлением ветра, то тоже должна возникнуть своеобразная решетка волн, не представляющая принципиального интереса для исследования.

В природе не встречается мгновенная смена направления ветра на прямо противоположное. Чаще всего наступает временное безветрие, предшествующее такой смене. Нетрудно убедиться, что в подобных случаях поведение зыби можно описать в соответствии с (³) на промежуточном этапе явления и в соответствии с настоящей статьей — на заключительном этапе.

Необходимо отметить, что все изложенное относилось лишь к зыби, оставшейся после первоначального ветра. Общеизвестно, что новый ветер не только гасит эту зыбь, но одновременно создает новые ветровые волны. Последние, очевидно, распространяются по поверхности зыби, исследованной в настоящей работе. Их развитие должно отличаться от развития волн на гладкой поверхности (¹, ²) лишь в том отношении, что оно сопряжено с повышенной турбулентной вязкостью воды вследствие предварительной турбулизации за счет старой системы ветровых волн.

Морской гидрофизический институт
Академии наук СССР

Поступило
2 VI 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. В. Шулейкин, ДАН, 94, № 4, 677 (1954). ² В. В. Шулейкин, ДАН, 94, № 6, 1049 (1954). ³ В. В. Шулейкин, ДАН, 95, № 3, 509 (1954).