

Е. М. Левкевич, В. Н. Юхновец

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА ВОДОЕМАХ С МАЛЫМИ РАЗГОНАМИ ВОЛН

Развитие многочисленных отраслей народного хозяйства БССР требует рационального использования водных ресурсов республики. Важное место при этом отводится поверхностному стоку, аккумулируемому искусственными водоемами. На территории БССР насчитывается 63 водохранилища, и в текущем десятилетии намечается построить еще 17 водохранилищ с различными площадями зеркала. Кроме того, имеется значительное количество прудов рыбхозов Главного управления рыбного хозяйства при СМ БССР, а также прудов колхозных и совхозных рыбхозов. Для большинства этих водоемов характерна малая длина разгона волн (от 0,2 до 2 км). Но и на этих водоемах ветровое волнение развивается такой интенсивности, что для предупреждения разрушения верховых откосов плотин и дамб требуется предусматривать защитную одежду откосов.

В некоторых случаях инженерные мероприятия по защите откосов от разрушений, выполненные с учетом требований нормативных документов, не являются эффективными. Причина здесь в том, что недостаточно известен механизм взаимодействия нерегулярного волнения с откосами гидросооружений. Еще не раскрыты надлежащим образом условия работы этих сооружений при ветровом волнении. Это распространяется и на элементы ветрового волнения не только перед сооружением, но и на акватории.

Исследованию ветрового волнения на крупных водохранилищах посвящен ряд работ. Параметры ветрового волнения на акватории во взаимосвязи с волнообразующими факторами изучены в этих условиях относительно хорошо. Однако на водоемах с малой длиной разгона волн, где ветровому волнению в целом присущи основные черты морского волнения [1], данный вопрос исследован недостаточно из-за одновременного действия на волнение многих факторов.

Особенности волнения на малых водоемах обусловлены специфической обстановкой развития и затухания волнения. Эта специфика в основном заключается в недостаточной глубине водоема и сравнительно небольшом объеме воды, участвующей в движении при волнении, что ограничивает размеры волн. Но даже и тогда, когда по кинематическому признаку водоем является глубоководным ($H > \lambda/2$), ветровые волны на нем будут ниже волн в открытых частях морей при одинаковых волнообразующих факторах [2].

Высота волн в этих условиях есть функция

$$h = f(\omega^n D^m),$$

где D — длина разгона волн, км; показатели степени n и m — переменные и зависят от величины относительного разгона

$$d = \frac{D}{\omega^2}.$$

Величина $n \geq 1$, а величина $m < 0,5$. Для сопоставления уместно отметить, что на больших разгонах $n=2$, $m=0$ [3].

Для совсем малых разгонов тесная связь между h , ω , D не существует [4]. По-видимому, здесь имеет место неустойчивость воздушного потока при его переходе на водную поверхность. Степень воздействия ветра на поверхность воды на этом переходном участке, простирающемся по направлению действия ветра до 1 км [5], обусловлена рядом причин и неоднозначно связана со средней скоростью ветра, измеренной на фиксированной высоте. На разгонах $D < 1$ км с увеличением ω отмечается весьма заметная тенденция уменьшения безразмерных высот волн $g\bar{h}/\omega^2$ и безразмерных периодов gt/ω^2 .

Обычно характер волнения в какой-либо точке любого водоема определяется ветром, действующим над водной поверхностью в течение определенного времени. Для водоемов с большими разгонами это время может быть значительным и достигает нескольких десятков минут. Для водоемов с малыми длинами разгона волн оно определяется ветром, действующим в течение нескольких минут. Изменение параметров волн происходит почти синхронно с изменением ветра во времени. С переменой ветра по направлению в пределах 90 — 180° волны новой системы быстро вытесняют волны старой системы.

На размеры ветровых волн на малых водоемах оказывает также влияние конфигурация водоема, угол встречи воздушного потока с поверхностью воды, обусловленный наличием препятствий у береговой черты (лесные массивы, крутые обрывистые берега), гидрологические, морфометрические характеристики водоема и др.

Многообразие факторов, влияющих на элементы ветровых волн на малых водоемах, усложняет изучение этого явления. Именно поэтому не всегда возможно использовать рекомендации морской волновой гидравлики, где они имеют надежную физическую и теоретическую базу. Имеются в виду теория ветрового волнения акад. В. В. Шулейкина [6], не гарантирующая точность расчетов при малом значении отношения

$\frac{D}{\omega\tau_\infty}$ (конкретно предел не указывается); статистическая и спектральная теории [7], также не дающие точности решения при величине отношения $gD/\omega^2 < 50$.

Так как материал натуральных наблюдений отличается разнородностью, то для определения расчетных параметров волн на водоемах с малой длиной разгона волн используются только эмпирические зависимости [7].

Особенностью волнения на малых водоемах является еще и то, что формы волнуемой поверхности более правильные, чем в море [8, 9], что объясняется ограниченностью или невозможностью образования и развития волн вторичных систем и их наложения и пр. Это обуславливает более легкий режим работы сооружений в условиях воздействия волнения, развивающегося на малых разгонах. Действующими же нормативами [11] спектр волн рекомендуется единым и для моря и для водохранилищ. Естественно, что это приведет к удорожанию сооружений.

В то же время еще нет полной ясности в том, какой же действительный волновой спектр характерен для волн на малых водоемах. Это касается и крутизны волн на малых разгонах. Для водохранилищ принято считать, что наиболее высокие волны являются наиболее крутыми [9]. Вместе с тем известно [10], что на малых разгонах высоким волнам отвечают только большие значения периодов и наоборот, т.е. коэффициент корреляции между h и τ близок к единице. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что ветровые волны на малых разгонах обладают большей энергией, а следовательно, и большей разрушающей способностью. Это следует принимать во внимание в инженерных расчетах.

Нами изучалось ветровое волнение на относительно небольших водоемах БССР. Первым объектом исследований явилось водохранилище Осиповичской ГЭС, его приплотинная озеровидная часть (длина около 1750 м, средняя ширина 1000 м), расположенная длинной стороной по направлению с юго-востока на северо-запад. Береговая линия в этой части относительно ровная, без заливов и бухт. Левый, восточный, берег, подвергающийся действию наиболее часто повторяющихся ветров западного направления, высокий (2—6 м), обрывистый (результат происходящих процессов абразии). Правый, западный, берег более низкий, покрыт густым лесом, северная часть его занята полями, на восточном берегу (в нижней части) расположено селение.

Осенью 1971 г. на водохранилище был проведен цикл волновых наблюдений. Гидролого-гидрометеорологические условия характеризовались следующими данными: D — длина разгона волн 0,25—1,5 км; H — глубина водоема по пути разгона в среднем 3,5 м; ω_{10} — анемометрическая скорость ветра, приведенная к высоте 10 м над уровнем воды, 5—12 м/сек. Была произведена регистрация 22 серий волн.

Датчиком для записи волн послужили электроконтактные вехи с контактами через 5 см, установленные на расстоянии 16 м перед откосом земляной плотины, верховой откос которой укреплен каменной наброской. Записи осуществлялись при помощи осциллографа Н-700. В каждой серии регистрировалось от 100 до 200 волн.

В результате обработки получены спектры высоты волны, характеризующиеся модульными коэффициентами $k_h = \frac{h_i\%}{h}$. Экспериментальные

данные сравнивались с расчетными по действующим нормативам или рекомендациям.

Относительно связи h с волнообразующими факторами выявилось следующее. В простых условиях волнообразования, когда ветер дул с открытых участков берега, при расчетной длине разгона более 0,7 км опытные значения высоты волны сопоставимы с расчетными (табл. 1), которые определялись по нормативной литературе [11].

В сложных условиях волнообразования, когда воздушный поток перед тем как перейти на водную поверхность преодолевал препятствие в виде густого леса, такого соответствия между высотами волн не имеется. Опытные значения $h_{i\%}$ значительно больше расчетных, что видно из табл. 2.

Следует отметить, что эти данные относятся к области акватории, где процессу волнообразования присущи свойства переходного участка. Значительное превышение опытных высот волн над расчетными в условиях опытов (табл. 2) можно связать с наличием повышенных нормальных напряжений, действующих на водную поверхность при встрече

Таблица 1

ω_{10} , м/сек	9,1	9,1	6,8	6,8	9,1	10,7	10,7	13,0	13,0
D_p , км	1,5	1,5	1,5	1,5	0,93	0,72	0,72	0,72	0,72
$h_{1\%(p)}$, см	34	34	26,0	26,0	28	29,0	29,0	35	35
$h_{1\%(o)}$, см	35,5	38,2	26,5	29,2	29,0	31,0	31,2	33,1	35,5
$\frac{h_0 - h_p}{h_0}$ 100, %	4	11	2	11	3	6	7	6	1

Примечание. Обозначения: ω_{10} — скорость ветра на высоте 10 км над уровнем моря; D_p — расчетная длина разгона волн; $h_{1\%}$ высота волны 1%-ной обеспеченности в группе.

Таблица 2

ω_{10} , м/сек	7,5	7,5	7	7	7,2	7,2	7,2	8,5	8	10,2	10,6	6,0
D_p , км	0,35	0,35	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,35	0,35	0,35	0,6	0,6
$h_{1\%(p)}$, см	14	14	13	13	14	14	14	17	16	20	27	14
$h_{1\%(o)}$, см	26,7	27,9	24,7	25,9	25,5	27,6	28,6	29,2	29,2	34,2	33,1	22,3
$\frac{h_0 - h_p}{h_0}$ 100, %	47	50	47	50	45	49	51	42	45	42	18	37

с ней воздушного потока под углом, в результате обтекания им лесного массива, вплотную подступающего к урезу воды. В таких условиях неизвестен механизм передачи волнам ветровой энергии.

Полученный в результате обработки всех осциллограмм безразмерный спектр высоты волны значительно уже не только нормативного [11], но достаточно хорошо изученного спектра на больших водохранилищах Европейской части СССР [9]. Характеристики этих спектров приведены в табл. 3.

Таблица 3

Обеспеченность, %	1	2	5	10	20	30	40	50	70	90	95
по СН 92—60 [11]	2,52	2,28	1,91	1,69	1,38	1,21	1,05	0,93	0,69	0,37	0,23
по данным 6,9	2,1	1,8	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	0,97	0,8	0,6	0,5
k_h опытное	1,81	1,7	1,54	1,41	1,26	1,16	1,07	0,97	0,88	0,76	—

Данные табл. 3 качественно согласуются с результатами других авторов [8, 9]. Однако фактических материалов по спектру h и других элементов волн на малых водоемах в литературе крайне недостаточно.

Учитывая актуальность рассматриваемого физического явления, в заключение следует указать на необходимость дальнейшего всестороннего изучения ветрового волнения на малых водоемах для разработки новой или совершенствования и развития уже существующих методик по расчету параметров ветровых волн в таких условиях.

Литература

1. А. С. Судольский. Ветровое волнение на Кайракумском водохранилище. Труды ГГИ, вып. 106, 1963.
2. Ю. М. Крылов. Метод расчета высоты волн глубокого моря с учетом формы береговой черты. Труды Союзморниипроекта, вып. 8, 1965.
3. Л. Г. Сидорова, Г. Ф. Красножон. Расчет параметров ветровых волн при определении волновых нагрузок на гидротехнические сооружения. Труды океанографической комиссии, вып. 9, 1960.
4. Г. Ф. Красножон. Некоторые актуальные вопросы волновых исследований. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 61, 1970.
5. М. П. Тимофеев. Метеорологический режим водоемов. М., 1963.
6. В. В. Шулейкин. Физика моря. М., 1968.
7. Руководство по расчету параметров ветровых волн. М., 1969.
8. Л. Н. Иконникова. О разнообразии высот волн на малых разгонах. «Океанология», 1971, № 5.
9. В. С. Шайтан. Крепление земляных откосов сооружений и берегов водохранилищ. Автореф. дисс. М., 1972.
10. Г. В. Ржеплинский и др. Новый метод анализа и расчета элементов ветровых волн. Труды ГОИН, вып. 93, 1968.
11. Технические условия определения волновых воздействий на морские, речные сооружения и берега. СН 92-60. М., 1960.