

## РАСЧЕТ ВОЛН НА КРУПНЫХ КАНАЛАХ

Эшев С.С., Рахимов А.Р., Латипов Ш.А., Усмонов Р.Н.

Предлагается метод прогноза ветровых волн для условий крупных каналов, где на участке разгона на процесс развития волн влияют стационарное течение и ограниченная ширина акватории. Метод основан на использовании уравнения сохранения спектральной плотности волнового действия и экспериментальных данных. Позволяет по известным длине разгона, глубине, ширине канала, скоростям ветра и течения определить средние элементы волн и функции распределения высот волн вдоль разгона. Приведены примеры расчета.

**Ключевые слова:** крупный канал, разгон волн, параметры волн, спектральная плотность, ветровая волна.

### АННОТАЦИЯ

Катта каналлар шароитлари учун уларнинг тўлқин жадаллашув участкаларидаги тўлқинлар ривожланишининг жараёнига стационар оқим ва ҳавзанинг чегараланган эини таъсирини инобатга оладиган шамол тўлқинларини прогноз қилиш усули таклиф этилган. Усул тўлқин ҳаракати спектрал зичлиги сақланиш тенгламаси ва экспериментал маълумотлардан фойдаланганлиги билан асосланади. Канал учун берилган жадаллашиш узунлиги, чуқурлиги, эни, шамол тезлиги ва оқимларида жадаллашув узунлиги бўйича тўлқин ўртача параметрлари ва тўлқин баландлиги тақсимланишининг функцияси аниқланади. Масалалар ечиш намунаси келтирилган.

**Калит сўзлар:** йирик канал, тўлқинлар жадаллашиши, тўлқин параметрлари, спектраль зичлик, шамол тўлқини.

### ABSTRACT

A method is proposed for predicting wind waves for the conditions of large channels, where the process of wave development in the acceleration section is affected by a stationary current and a limited width of the water area. The method is based on the use of the conservation equation for the spectral density of the wave action and experimental data. It allows to determine the average elements of the waves and the distribution functions of the wave heights along the acceleration from the known fetch length, depth, channel width, wind and current velocities. Calculation examples are given.

**Keywords:** large channel, wave acceleration, wave parameters, spectral density, wind wave.

При определении деформаций от ветровых волн на берега и больших каналов и водохранилищ возникает задача расчет ветровых волн, имеющая отличия от аналогичной задачи для условий глубоких вод. Основные из этих отличий связаны с влиянием на процесс генерации ветровых волн стационарного течения и ограниченной ширины канала. Существующие нормативные методы расчета волн не полностью учитывают этих факторов. В статье предлагается способ их учета в методике расчета ветровых волн. Способ основывается на современном представлении о генерации ветровых волн, имеющихся данных натурных наблюдений и экспериментальных исследований.

Рассмотрим влияние течения и ширины канала отдельно. Начнем с влияния течения. Пусть скорость ветра  $W$  коллинеарна скорости течения  $u$ . Скорость ветра, как принято в существующих методиках, определяется на высоте 10 м над уровнем воды,  $u$  — скорость, осредненная по глубине к ширине потока. Длина разгона  $x$  измеряется вдоль оси канала на его прямолинейном участке, рассмотрением которого здесь и ограничимся. Взаимодействие волн с течениями на поворотных участках канала имеет значительно более сложный характер, можно ожидать, что даже при малых углах поворота канала на этих участках волны будут существенно трансформироваться. Предположим, что скорости ветра и течения медленно изменяются во времени и по расстоянию, т. е. существенно изменяются за много периодов волн и на расстояниях, многократно превышающих длину волн. Таким образом, случай, когда эти величины стационарны и однородны по координате, входит в рассмотрение как частный.

В одномерной стационарной постановке изменение спектральной плотности волнового действия описывается уравнением:

$$\frac{\partial N(\omega, x)}{\partial x} C_{ga}(\omega) = S(\omega, x), \quad (1)$$

где  $N(\omega, x) = E(\omega, x) / \omega_r$  — частотный спектр волн:  $\omega_r$  — частота, соответствующая данной спектральной компоненте  $\omega$  в точке с абсциссой  $x$  в системе координат, движущейся со скоростью течения  $u$ ;  $C_{ga}$  — групповая скорость спектральной компоненты  $\omega$  в неподвижной системе координат; член  $S$  учитывает действия ветра и вязкости на волны и их нелинейность.

Уравнение (1) является упрощением для стационарной и одномерной задачи известного кинетического уравнения для спектральной плотности волнового действия в движущейся среде в адиабатическом приближении [1]. Вопрос определения члена  $S$  до сих пор является одним из самых сложных в теории

генерации ветровых волн. Достаточно достоверной можно считать часть в виде  $\alpha N$ , отмечающей экспоненциальному нарастанию волн, где  $\alpha(\omega, W)$  - инкремент нарастания [2].

Для каждой спектральной компоненты введем преобразование координаты:

$$\frac{X}{x} = \frac{C_{go}}{C_{ga}}, \quad (2)$$

где  $C_{go}$  - групповая скорость, волн в отсутствие течения.

Подстановка выражения (2) в (1) приводит к уравнению:

$$\frac{\partial N}{\partial X} C_{go} = \alpha N. \quad (3)$$

Если предположить, что  $\alpha(\omega, W) = \alpha_o(\omega, W)$ , т.е. инкремент нарастания ветровых волн в случае течения и без течения одинаково зависит от частоты и скорости ветра, то уравнение (3) совпадает с уравнением для изменения плотности волнового действия в отсутствие течения, получающимся из (1) при  $u = 0$ . Подтверждением сделанного предположения являются массовые, крупномасштабные опыты в аэрогидроканале [3], результаты которых, при использовании преобразования (2), хорошо описываются эмпирическими зависимостями с одинаковыми коэффициентами для случаев отсутствия течения, а также течения, встречного или попутного ветру.

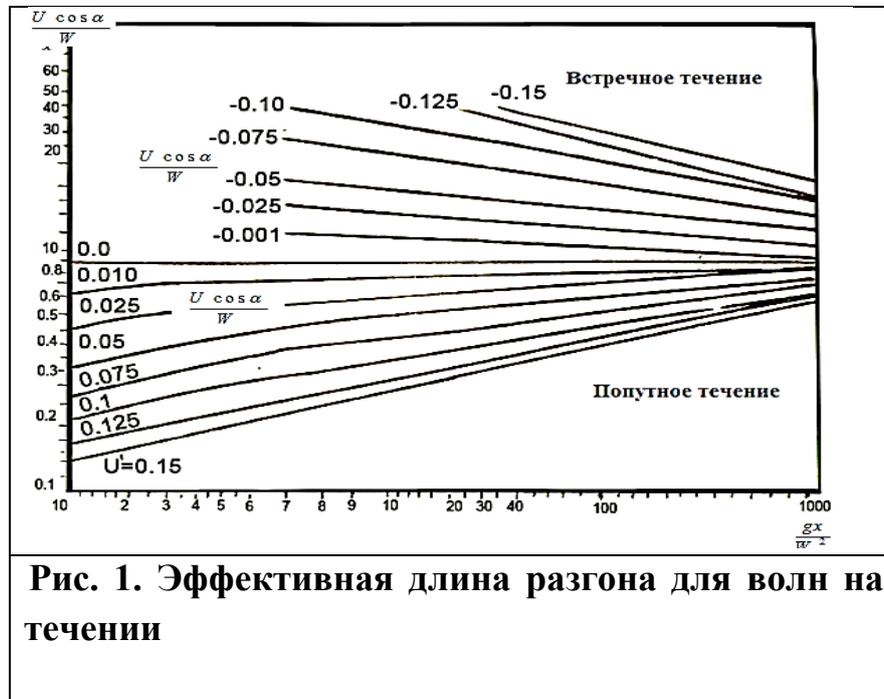
Назовем  $X$  в выражении (2) эффективной длиной разгона. Она относится к длине разгона  $x$ , как время взаимодействия ветра и волновой поверхности при наличии течения к тому же времени в случае отсутствия течения. Расчет эффективной длины разгона выполняется по формуле [3,7]

$$\frac{X}{x} = \frac{\int_0^x \frac{dx}{\bar{C}_{ga}(x)}}{\int_0^x \frac{dx}{\bar{C}_{go}(x)}}, \quad (4)$$

где  $\bar{C}_{ga}$  и  $\bar{C}_{go}$  - групповые скорости, соответствующие средней частоте в спектре. Отличие формулы (4) от (2) связано с использованием средней частоты спектра, которая, являясь энергетической, а не кинематической характеристикой, зависит от длины разгона. При интегрировании в формуле (4) используется зависимость  $\bar{\omega}_r(x)$  в виде, полученном из экспериментов [3, 7]:

$$\frac{\bar{\omega}_r W}{g} = 14.28 \left( \frac{gX}{W^2} \right)^{-0.354}, \quad (5)$$

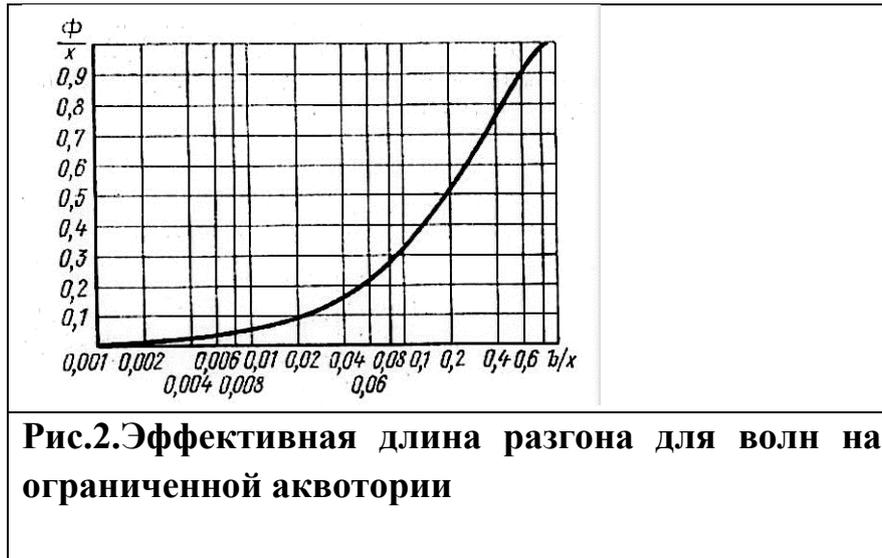
где  $\bar{\omega}_r(x)$ , — средняя относительная частота в спектре.



На рис. 1 показаны результаты расчета  $X/x$  в функции безразмерной длины разгона  $gx/W^2$  для различных относительных скоростей течения  $u/W$ .

На попутном течении, при  $X/x < 1$  и при прочих равных условиях, высота и период волн меньше, чем в отсутствие течения. На встречном течении, когда  $X/x > 1$ , наоборот, высота и период волн больше, чем в равных условиях в отсутствие течения. Такие качественные закономерности согласуются со всеми имеющимися натурными и лабораторными данными по генерации ветровых волн на течении.

Перейдем к оценке влияния ограниченной ширины канала на генерацию ветровых волн. В случае отсутствия течения путь получения таких оценок известен [4] и также заключается в использовании эффективной длины разгона, которую здесь обозначим  $\Phi$ . Предполагается, что ветер сохраняет свое эффективное значение в пределах  $\pm 30^\circ$  от оси канала. Тогда для прямоугольной в плане, а Рис. 2. эффективная длина разгона для волн на ограниченной акватории шириной  $b$  и длиной  $x$  (рис.2)



$$\frac{\Phi}{x} = \frac{\int_0^{\arctg \frac{b}{2x}} \frac{xd\theta}{\cos \theta} + \int_{\arctg \frac{b}{2x}}^{\pi/6} \frac{bd\theta}{2 \sin \theta}}{\int_0^{\pi/6} xd\theta} \quad (6)$$

или, после преобразований,

$$\frac{\Phi}{x} = \frac{6}{\pi} \left[ \ln \operatorname{tg} \left( \frac{1}{2} \arctg \frac{b}{2x} + \frac{\pi}{4} \right) - 1.317 \frac{b}{2x} - \frac{b}{2x} \ln \operatorname{tg} \left( \frac{1}{2} \arctg \frac{b}{2x} \right) \right]. \quad (7)$$

Расчеты  $\Phi/x$  в функции относительной ширины канала  $b/x$  представлены на рис. 2, который показываем, что ограниченная ширина канала может существенно влиять на элементы генерируемых ветреных волн. Заметим, что аналогичный метод учета влияния береговой линии на генерацию ветровых волн используется в СНиПе, однако там из-за сложной формы береговой линии получение аналитического решения вида (7) невозможно и приходится применять численный метод. Предположение о сохранении эффективности ветра в пределах  $\pm 30^\circ$  от оси канала соответствует имеющимся данным натурных наблюдений, выполненных в САНИИРИ на среднеазиатских ирригационных каналах. В других условиях это предположение требует проверки. При этом возможно как изменение углового раstra, так и введение весовых коэффициентов, учитывающих уменьшение волн образующей эффективности ветра при отклонении его направления от оси канала, в подынтегральные функции выражения (6). Другой возможный путь учета влияния ограниченной ширины канала состоит в непосредственном использовании измеренного углового распределения энергии ветровых волн. Однако такие данные для условий крупных рек или каналов пока отсутствуют.

Предполагая независимым влияние течения и ограниченной ширины канала на генерацию воли, получим для эффективной длины разгона с учетом обоих факторов

$$X_{ef} = \frac{\Phi}{x} \frac{X}{\Phi} x \quad (8)$$

Таким образом, предлагаемая методика расчета состоит в использовании известных зависимостей для средних элементов ветровых волн [6], в которые следует входить с эффективной длиной разгона, определяемой в соответствии с формулой (8):

$$\frac{g\bar{h}}{W^2} = 0.16 \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{1 + 6.0 \cdot 10^{-3} \left( \frac{gX_{ef}}{W^2} \right)^{0.5}} \right]^2 \right\}; \quad (9)$$

$$\frac{gT_r}{W} = 3.1 \cdot 2\pi \left( \frac{g\bar{h}}{W^2} \right)^{0.625} \quad (10)$$

где  $\bar{h}$  — средняя высота волн,  $T_r$  — средний относительный период.

Для определения средней длины волн используем дисперсионное соотношение:

$$\bar{\lambda} = \frac{gT_r^2}{2\pi} \quad (11)$$

**Пример расчета.** Определим средние высоту и длину волн в канале шириной  $b = 200$  м на прямолинейном участке длиной  $x = 5000$  м при расчетной скорости ветра  $W = 15$  м/с и скорости течения  $u = 0.5$  м/с. Для сопоставления выполним расчет без учета влияния течения и расчет без учета влияния течения и ширины канала. Результаты расчетов представим в виде таблицы, удобной для сопоставления (см. Таблицу).

Рассмотрим важный в инженерных приложениях вопрос определения функции распределения высот волн в условиях акватории ограниченной ширины с течением, Для условий морей используется следующая функция распределения высот ветровых волн в форме Вейбулла, полученная по результатам анализа натуральных и лабораторных данных [6]:

$$F\left(\frac{h}{\bar{h}}\right) = \exp\left[-\varphi\left(\frac{gx}{W^2}\right)\left(\frac{h}{\bar{h}}\right)^{\varphi_2\left(\frac{gx}{W^2}\right)}\right] \quad (12)\Gamma$$

— гамма-функция.

Таким образом, функция распределения высот ветровых волн зависит только от безразмерной длины разгона. Используя введенное выше понятие эффективной длины разгона для ограниченной акватории с течением,

естественно предположить, что функция распределения высот волн в таких условиях будет определяться зависимостью (12), где вместо длины разгона  $x$  применяется эффективная длина разгона  $X_{ef}$ .

Пример расчета

Метод расчета	$\frac{gx}{w^2}$	$\frac{u}{w}$	$\frac{b}{x}$	$\frac{x}{x}$ (рис.1)	$\frac{\phi}{x}$ (рис.2)	$X_{ef}, M,$ по(8)	$\bar{h}_M,$ по (9)	$\bar{T}, c,$ по (10)	$\bar{\lambda}_M,$ по (11)
Без учета влияния течения и ширины канала	219	-	-	-	-	5000	0,57	2,96	13,7
Предлагаемая методика $u = 0$	219	0	0,04	1,0	0,17	850	0,24	1,73	4,7
Предлагаемая методика $u = 0.5 м/с$	219	0,034	0,04	0,72	0,17	612	0,20	1,54	3,7
Предлагаемая методика $u = -0.5 м/с$	219	-0,034	0,04	1,4	0,17	1190	0,36	2,2	7,8

**ВЫВОДЫ**

1. Существующие методики расчета ветровых волн [5] не учитывают влияния течения. В статье обоснован и предложен способ учета влияния течения и ограниченной ширины акватории и на генерацию ветровых волн в условиях больших каналов, рек, проточных водохранилищ и эстуариев.
2. Уточнение элементов волн при использовании предложенной методики по сравнению с нормативным методом расчета составляет для средней высоты зои 50% и более, а для средней длины волн — 70% и более.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ: (REFERENCES)**

- 1.Бабосович А.Я. Трансформация спектра поверхностного волнения под действием внутренней волны. - Физика атмосферы к океану, 1979. т. 15. №6, с 655—661.
- 2.Бабосович А.Я. Бахонов В.В., Таланов В.И. Влияние интенсивных внутренних волн на ветровое волнение (кинематическая модель). - В кн.: Воздействие крупномасштабных внутренних ноли на морскую поверхность. Горький. Институт прикладной физики АН СССР, 1982. с. 8 –30.
3. Kato H., Tsuruya H. Experimental study of wind waves generated on currents. Proc 16th) (Coast. Eng. Conf., Hamburg, 1978. N.-Y., 1979, vol. 1, p. 742—755.

4. Wood A. M. M Coastal hydraulics. Bath. Pitman press, 1969, p. 179.
5. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Стройиздат, 1983. 37 с.
6. Крылов Ю. М. Стрекалов С. С., Цыплухин В. Ф. Ветровые полны и на сооружения. Л., Гидрометеоздат, 1976, 256 с.
7. Эшев С.С. Расчет деформируемых больших земляных каналов в условиях нестационарности водного потока. Ташкент. ” Voris nashriyot”, 2018. -187с.