

УДК 532.591 (551.556.8)
DOI: 10.25686/2542-114X.2021.3.41

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВЫХ ВОЛН, РАЗВИВАЮЩИХСЯ НА АКВАТОРИИ ВОДОХРАНИЛИЩ

В. Г. Котлов, А. Г. Поздеев, Ю. А. Кузнецова

Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола)

Параметры ветровых волн, развивающихся на акватории водохранилищ, оказывают влияние на надежность эксплуатации гидротехнических сооружений. Определение реакции конструкций, расположенных на акваториях водохранилищ, на волновую нагрузку является основой расчета прочности сооружений гидроузлов. Динамический характер волновых нагрузок вызывает рост напряжений в конструкции, что при длительном периоде эксплуатации сооружений может служить причиной их разрушения.

Оценка параметров ветровых волн, развивающихся на акватории водохранилищ, влияющих на силовое воздействие воды на погруженные конструкции, определяет устойчивость и степень надежности функционирования гидроузлов. В связи с этим в работе произведена автоматизация вычисления распределений направления и скорости ветра во времени на акватории водохранилища на основе модели Вейбулла в среде MathCad, что позволило построить графики изменения величины и направления скорости ветра на акватории Чебоксарского гидроузла в зависимости от месяца года. Обработка исходных данных произведена на основе сплайн-аппроксимации коэффициента вариации скорости, величины и направления вектора скорости дрейфа волнения.

В результате определена плотность распределения давления поверхностных волн в зависимости от частоты при различных скоростях волн. Произведена оценка воздействия волны синусоидальной формы на формирование сил, поддерживающих плавающие тела. Вычислены геометрические параметры поверхностных волн на основе решения дифференциального уравнения второго порядка.

Ключевые слова: водохранилище; акватория; реакция конструкции; устойчивость сооружений; ветровая волна; дрейф волнения; силовое воздействие; модель Вейбулла; скорость ветра; плотность распределения давления; MathCad.

Введение. Параметры ветровых волн, развивающихся на акватории водохранилищ, оказывают существенное влияние на устойчивость и надежность эксплуатации гидротехнических сооружений. Определение реакции конструкций на волновую нагрузку составляет наиболее важную часть расчета прочности сооружений гидроузлов. Динамический характер волновых нагрузок приводит к увеличению напряжений в конструкции, что может служить причиной их разрушения, особенно с учетом длительного периода эксплуатации сооружений [5].

Определение направлений волн важно в усталостных расчетах, так как неучет этого фактора может привести к занижению вели-

чины повреждений сооружения при длительном воздействии волн.

В процессе прогнозирования динамических нагрузок на сооружения необходимо использовать данные по ветровым волнам с допущением, что вероятности распределений направления и скорости ветра во времени на акватории водохранилища могут быть математически описаны [1].

При полностью развитом волнении для расчета динамических нагрузок могут быть использованы спектральные методы.

Определение волновых воздействий на сооружения, в частности на элементы конструкций малого диаметра, — сложная задача. Исходя из различных теорий, волны можно описать аналитически, но некоторые допол-

нительные явления, связанные с ударным воздействием волн, не поддаются простому описанию и количественному определению.

При проектировании морских сооружений следует различать следующие волновые режимы [2]:

$d / \lambda > 1$ (d — диаметр преграды или его другой характерный линейный размер; λ — длина волны) — почти полное отражение волн;

$d / \lambda > 0,2$ — дифракция важна;

$d / \lambda < 0,2$ — дифракцией можно пренебречь;

$d / w_0 > 0,2$ (w_0 — параметр ширины орбиты, равный высоте волны на глубокой воде) — инерционная составляющая волновой нагрузки становится доминирующей;

$d / w_0 < 0,2$ — преобладает скоростная составляющая волновой нагрузки.

Целью работы является оценка параметров ветровых волн, развивающихся на акватории водохранилищ, влияющих на силовое воздействие воды на погруженные конструкции, которые определяют устойчивость и степень надежности функционирования гидротехнических сооружений.

Решаемые в ходе исследования задачи следующие: автоматизация вычисления распределений направления и скорости ветра во времени на акватории водохранилища на основе модели Вейбулла в среде MathCad; построение графиков изменения величины и направления скорости ветра на акватории Чебоксарского гидроузла в зависимости от месяца года на основе сплайн-аппроксимации коэффициента вариации скорости; вычисление величины и направления вектора скорости дрейфа волнения; определение плотности распределения давления поверхностных волн в зависимости от частоты при различных скоростях волн; оценка воздействия волны синусоидальной формы на формирование сил, поддерживающих плавающие тела; вычисле-

ние геометрических параметров поверхностных волн на основе решения дифференциального уравнения второго порядка.

Предмет исследования — автоматизация вычисления параметров ветровых волн, развивающихся на акватории водохранилищ и влияющих на силовое воздействие воды на погруженные конструкции.

Практическая значимость работы состоит в повышении надежности функционирования гидротехнических сооружений.

Основные теоретические положения. Для расчета плотности распределения скорости ветра в районе Чебоксарского водохранилища вычислим параметры распределения Вейбулла в среде MathCad [6; 8].

Прежде всего, вычислим плотность вероятности Вейбулла встроенной функцией MathCad:

$$t_d(v, \alpha) := \text{dweibull}(v, \alpha),$$

где α — параметр формы.

График параметра формы, построенный на основе встроенной функции `dweibull`, при параметре формы $\alpha = 1, 2, 3$ приведен на рисунке 1.

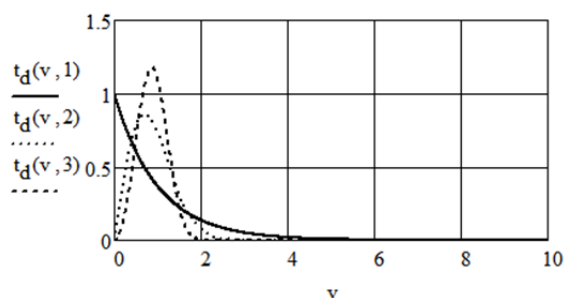


Рисунок 1. Плотность вероятности Вейбулла по встроенной функции MathCad

Введя масштабный коэффициент $\beta := 1$, получим для вычисления плотности вероятности Вейбулла аналитическую зависимость

$$t_{d-p}(v, \alpha) := \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha}.$$

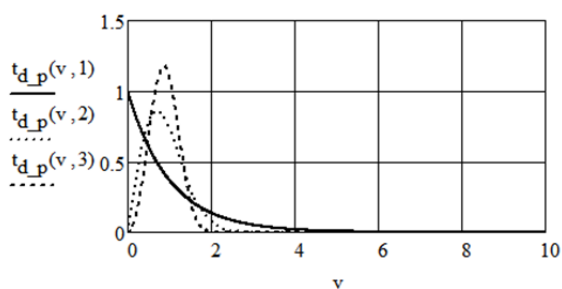


Рисунок 2. Плотность вероятности Вейбулла по аналитической зависимости

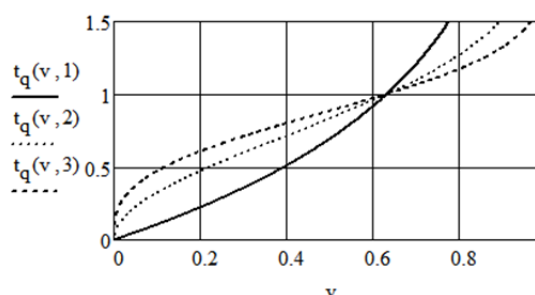


Рисунок 3. Кумулятивное распределение вероятности Вейбулла по встроенной функции MathCad

Из рисунков 1 и 2 следует, что графики плотности вероятности Вейбулла, полученные по встроенной функции MathCad и по аналитической зависимости, полностью идентичны.

Моделирование процессов. Затем находится кумулятивное распределение вероятности

сти Вейбулла по встроенной функции qweibull MathCad (рис. 3)

$$t_q(v, \alpha) := \text{qweibull}(v, \alpha).$$

Характеристика ветров в Чувашской Республике приведена в таблице 1.

Таблица 1

Ветра в Чувашской Республике

Расположение метеостанции	Среднегодовая скорость ветра (на высоте 10 м)	Средняя скорость ветра, м/с				Максимальная скорость ветра, м/с
		зима	весна	лето	осень	
Чебоксары	4,1	4,4	4,3	3,4	4,2	2

На основании табличных данных по относительным межгодовым изменениям повторяемости ветра находим коэффициент вариации. Введем коэффициент вариации скорости ветра $C_v := 0.36$. По формуле Л. Б. Гарцмана получим значение параметра $\alpha := C_v^{-1.069}$, $\alpha := 2.981$. Определив величину средней скорости за рассматриваемый период $v_{cp} := 4.1$ м/с и масштабный коэффициент $\beta := \frac{v_{cp}}{\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha})}$, вычис-

лим плотность вероятности Вейбулла по аналитической зависимости

$$t_{d_p}(v, \alpha) := \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha},$$

где $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) :=$ — встроенная гамма-функция MathCad

Результаты расчета плотности вероятности Вейбулла по данным таблицы 1 на основе

аналитической зависимости скорости ветра на акватории Чебоксарского гидроузла приведены на графике (рис. 4).

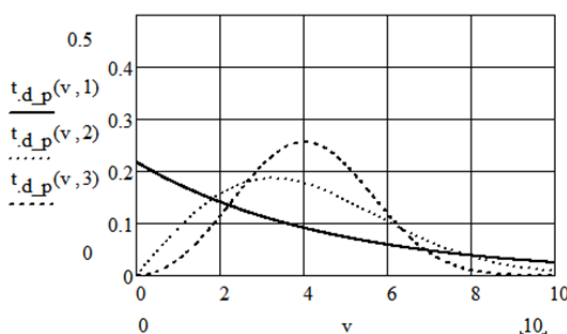


Рисунок 4. Плотность вероятности Вейбулла скорости ветра на акватории Чебоксарского гидроузла

Среднегодовая или среднемесячная скорость ветра — это усредненный показатель, рассчитанный на основе 10-летних наблюдений. В таблицах использована скорость ветра на высоте 10 метров от поверхности земли.

Этот показатель напрямую влияет на эффективность использования энергии ветра.

Чувашская Республика, как и все другие регионы, имеет собственные показатели интенсивности ветра, но не всегда целесообразно изучение обширных таблиц NASA. Поэтому в таблице 2 приводится усредненное направление ветра, относительно сторон света. Это позволяет рассчитать эффективность использования энергии ветра для любого времени года.

Таблица 2
Значения направления и скорости ветра
в г. Чебоксары (Чувашская Республика)

Месяц	Скорость ветра, м/с	Направление ветра
Январь	3,29	209
Февраль	3,39	205
Март	3,25	203
Апрель	3,20	205
Май	3,06	211
Июнь	2,88	211
Июль	2,82	216
Август	2,95	222
Сентябрь	3,20	224
Октябрь	3,25	228
Ноябрь	3,23	225
Декабрь	3,24	223
Среднее за год	3,14	

Ниже приведена таблица 3, введенная по ссылке из внешнего файла данных.

Таблица 3
K :=

C:\Users\...\Таблица.txt

	0	1	2
0	1	3.29	209
1	2	3.39	205
2	3	3.25	203
3	4	3.2	205
4	5	3.06	211
5	6	2.88	211
6	7	2.82	216
7	8	2.95	222
8	9	3.2	224
9	10	3.25	228
10	11	3.23	225
11	12	3.24	223

Преобразуем матрицу в функцию второго столбца от первого

$$M_{таб} := K^{(0)}; V_{таб} := K^{(1)};$$

$$V(M) := \text{interp}(cspine(M_{таб}, V_{таб}), M_{таб}, V_{таб}, M).$$

На основе приведенной сплайн-аппроксимации построена зависимость скорости ветра от времени (рис. 5).

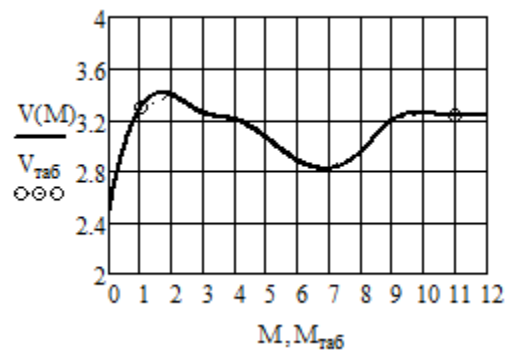


Рисунок 5. Изменение величины скорости ветра, м/с, от месяца года (по данным метеостанции г. Чебоксары)

Преобразование матрицы в функцию третьего столбца от первого имеет вид

$$M_{таб} := K^{(0)}; W_{таб} := K^{(2)};$$

$$W(M) := \text{interp}(cspine(M_{таб}, W_{таб}), M_{таб}, W_{таб}, M).$$

и позволяет построить график зависимости направления ветра от времени (рис. 6).

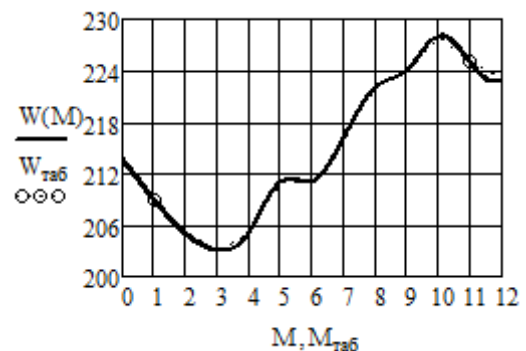


Рисунок 6. Изменение направления ветра, °, от месяца года (по данным метеостанции г. Чебоксары)

Вычислим величину и направление вектора скорости дрейфа волнения и установим

связь между спектральным распределением давлений и скорости волн в виде

$$S_{pp}(f) = (C_d \rho_a V)^2 S_{vv}(f),$$

где $S_{pp}(f)$ — спектральная зависимость давлений ветра от частоты колебаний f ;

$S_{vv}(f)$ — спектральная зависимость скоростей ветра от частоты колебаний f ;

C_d — коэффициент сопротивления формы объекта волнового воздействия;

ρ_a — плотность атмосферы;

V — скорость ветра.

Волны в зависимости от геометрических параметров полностью отражаются, если $\frac{d}{\lambda} > 1$, а влияние дифракционных явлений становится основным при условии

$$\frac{d}{h} > 0,2,$$

где h — основной размер тела, взаимодействующего с волной;

λ — длина волны;

d — диаметр окружности вращения жидкой частицы при большой глубине воды.

На акватории Чебоксарского водохранилища выполняются указанные условия, что сопровождается преимущественным развитием инерционных эффектов, поэтому вязкость в расчете можно не принимать во внимание.

Для получения обратной функции выполним сначала преобразование функции в матрицу, задав вектор скорости ветра $v_{маб} := (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10)^T$

$$S_{vv}(f) := \text{interp}(cspline(f_{маб}, S_{vv_маб}), f_{маб}, S_{vv_маб}, f),$$

где $f := 0,0.01..0.25$.

Полученная зависимость матрицы плотности распределения скорости от частоты приведена на графике, представленном на рисунке 8.

Рисунок 8. Зависимость матрицы плотности распределения скорости от частоты

и введя число новых точек $m := 100$ и диапазон их изменения $i := 0..m$.

Наименьшее и наибольшее значения аргумента (временного интервала) следующие:

$$v_{маб_н} := \min(v_{маб}); \quad v_{маб_к} := \max(v_{маб}).$$

Новый вектор аргумента (временного интервала) определяется в виде

$$v_i := v_{маб_н} + i \cdot \frac{v_{маб_к} - v_{маб_н}}{m}.$$

Введение матрицы плотности скорости и частоты в диапазоне убывания до среднего значения позволяет записать

$$i := 0..40; \quad S_{vv_маб_i} := v_{маб_i};$$

$$f_{маб_i} := f_{d_p}(v_{маб_i}, \alpha).$$

Зависимость матрицы плотности распределения скорости от частоты приведена на рисунке 7.

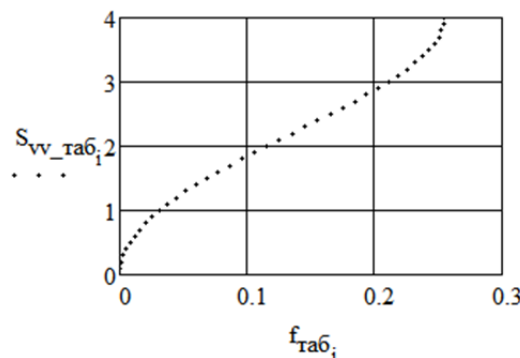
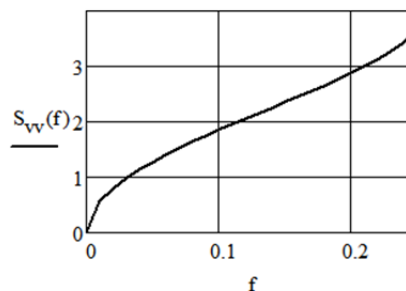


Рисунок 7. Зависимость матрицы плотности распределения скорости от частоты

Сплайн-интерполяция матрицы и построение функции имеет вид



Табличные значения температуры, К, следующие:

$$T_{таб} := (200 \ 250 \ 300 \ 350 \ 400 \ 450 \ 500 \ 550 \ 600 \ 650)^T.$$

Табличные значения плотности воздуха имеют вид

$$\rho_{таб} := (1.7684 \ 1.4128 \ 1.1774 \ 0.998 \ 0.8826 \ 0.7833 \ 0.7048 \ 0.6423 \ 0.5879 \ 0.543)^T \text{ кг/м}^3.$$

Вектор значений плотности воздуха определяется встроенной функцией `pspline` в виде

$$v_\rho := \text{interp}(T_{таб}, \rho_{таб}).$$

Интерпретация зависимости плотности воздуха от температуры определяется зависимостью

$$\rho_\rho(T) := \text{interp}(v_\rho, T_{таб}, \rho_{таб}, T).$$

Текущая температура воздуха в градусах Цельсия равна $t := 12$ °С, что соответствует температуре в градусах Кельвина:

$$T := t + 273.5; \quad T = 283.5 \text{ К.}$$

Текущая плотность воздуха

$$\rho_\rho := \rho_\rho(T); \quad \rho_\rho = 1.238 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент сопротивления формы объекта волнового воздействия $C_d = 0.4$

Спектральная зависимость давлений ветра от частоты колебаний [2; 9]

$$S_{pp}(f, v) := (C_d \cdot \rho_\rho \cdot v)^2 \cdot S_{vv}(f), \text{ Па.}$$

$$\rho(t_g) := (1000 - 0.062 \cdot t_g - 0.00355 \cdot t_g^2); \quad \rho := \rho(t_g); \quad \rho = 999.025 \text{ кг/м}^3.$$

Амплитуда волны $a_0 := 1$ м, длина волны $\lambda := 1.5$ м.

Длина сооружения $b := 4$ м.

Невозмущенная глубина воды $h := 2$ м.

Ускорение свободного падения $g := 9.81$ м.

Скорость волны $v_g := \sqrt{g \cdot h}$; $v_g = 4.429$ м/с.

Период линейной волны

$$T := \frac{\lambda}{v_g}; \quad T = 0.339 \text{ с.}$$

$$F_g(\tau) := \frac{b \cdot \rho \cdot g \cdot a_0}{k} \cdot (\sin(k \cdot b - \omega \cdot \tau) - \sin(\omega \cdot \tau)), \text{ Н.}$$

Для скоростей волны 1, 2, 3, 4, 5 м/с построены параметрические зависимости спектра давлений от частоты (рис. 9).

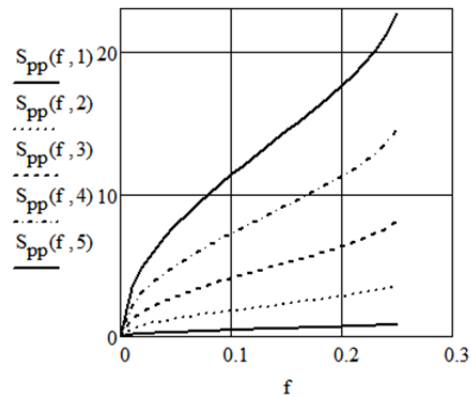


Рисунок 9. Зависимость матрицы плотности распределения давления от частоты при скоростях волн $v = 1, 2, 3, 4$ и 5 м/с

Текущая температура воды в градусах Цельсия $t_g := 10$ °С.

Плотность воды в функции температуры для заданной температуры

$$\text{Круговая частота волны } \omega := \frac{2 \cdot \pi}{T}, \text{ рад/с.}$$

$$\text{Волновое число } k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}; \quad k = 4 \text{ 1/м.}$$

Воздействие волны синусоидальной формы приводит к формированию сил, поддерживающих плавающие тела [4]:

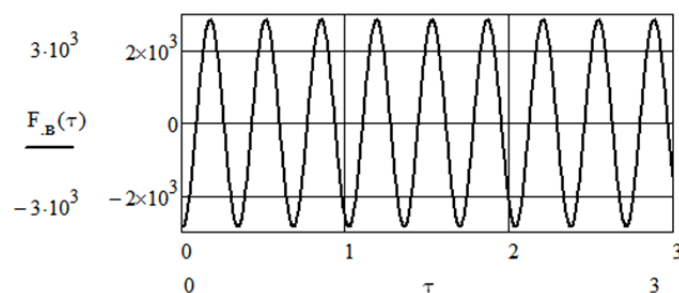


Рисунок 10. Динамика силы действия волны, поддерживающей плавающее тело

Усилие, воздействующее на фронтальную поверхность преграды, определяется изменением кинетической энергии частиц воды, поэтому динамическое давление на преграду [3]

$$p_{\phi} := \rho \cdot v_{\phi}^2 \cdot 10^{-3}; p_{\phi} = 19.601 \text{ кПа};$$

$$p_{\phi} := \rho \cdot g \cdot h \cdot 10^{-3}; p_{\phi} = 19.601 \text{ кПа}.$$

Частота излучаемых волн определяется законом движения сооружения

$$\omega_u := g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot h); \omega_u = 39.24 \text{ рад/с}.$$

Для глубокой воды ($k \cdot d > 2.6$)

$$\omega_u := \sqrt{g \cdot k}; \omega_u = 6.264 \text{ рад/с}.$$

Длина излучаемых волн

$$\lambda_u := 2 \cdot \pi \cdot \frac{g}{\omega_u^2}; \lambda_u = 1.571 \text{ м}.$$

Дифференциальное уравнение второго порядка для синусоидальной волны с частотой ω , движущейся вдоль оси x , имеет вид [7]

$$\frac{d^2}{dt^2} \eta(x) + k \cdot \eta(x)^2 = 0,$$

где $\eta(x) = a_0 \cdot \exp(-i \cdot k \cdot x)$.

Введем граничные условия для отклонения свободной поверхности:

$$\eta(0) = 0 \text{ м}; \eta(1) = 0,5 \text{ м}.$$

Решение уравнения встроенными функциями MathCad без учета формы волны [3; 7]:

Given

$$\eta''(x) + k \cdot \eta(x)^2 = 0$$

$$\eta(0) = 0 \quad \eta(1) = 0,5$$

$$\eta := \text{Odesolve}(x, 2)$$

$x := 0, 0.1 \dots 2$

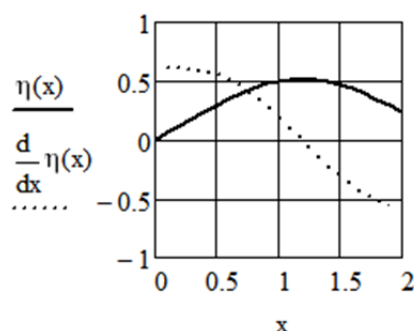


Рисунок 11. Решение дифференциального уравнения второго порядка для синусоидальной волны

Выводы

1. Произведена автоматизация вычисления распределений направления и скорости ветра во времени на акватории водохранилища на основе модели Вейбулла в среде MathCad.

2. Построены графики изменения величины и направления скорости ветра на акватории Чебоксарского гидроузла в зависимости от месяца года на основе сплайн-аппроксимации коэффициента вариации скорости.

3. Вычислены величина и направление вектора скорости дрейфа волнения при заданных исходных данных.

4. Определены плотности распределения давления поверхностных волн в зависимости от частоты при различных скоростях волн.

5. Произведена оценка воздействия волны синусоидальной формы на формирование сил, поддерживающих плавающие тела.

6. Вычислены геометрические параметры поверхностных волн на основе решения дифференциального уравнения второго порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арфкен Г. Математические методы в физике. Москва : Атомиздат, 1970. 712 с.
2. Бреббия К., Уокер С. Динамика морских сооружений. Ленинград : Судостроение, 1980. 230 с.
3. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. Москва : Наука, 1973. 408 с.
4. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. Москва : Мир, 1981. 600 с.
5. Поздеев А. Г., Кузнецова Ю. А. Оценка размыва нижнего бьефа гидроузла на основе методов технической диагностики и производственных функций // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 1. С. 36–46.
6. Поршнев С. В. Компьютерное моделирование физических систем с использованием пакета MathCAD : учебное пособие. 2-е изд., доп. Москва : Горячая линия – Телеком, 2011. 320 с.
7. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Москва : Наука, 1972. 375 с.
8. Семенов М. Г. Математическое моделирование в MathCad. Москва : Альтекс-А, 2003. 208 с.
9. Сретенский Л. Н. Теория волновых движений жидкости. Москва : Наука, 1977. С. 54–60.

Информация об авторах

КОТЛОВ Виталий Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и водоснабжения, директор института строительства и архитектуры Поволжского государственного технологического университета, советник РААСН, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов — соединения элементов деревянных конструкций, тепломассоперенос. Автор 128 публикаций, в том числе 3 монографии, 6 учебных пособий и 8 авторских свидетельств и патентов РФ и 13 патентов на полезную модель. E-mail: KotlovVG@volgatech.net

ПОЗДЕЕВ Анатолий Геннадиевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций и водоснабжения, советник РААСН, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов — исследование и моделирование русловых процессов в нижних бьефах гидроузлов, математическое моделирование в гидродинамике и экологии, автоматизация расчета инженерных систем водо-, газо- и теплоснабжения в строительстве. Автор более 100 публикаций, в том числе 10 монографий, 13 учебных пособий, 11 патентов и авторских свидетельств на изобретения. E-mail: PozdeevAG@volgatech.net

КУЗНЕЦОВА Юлия Анатольевна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций и водоснабжения, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов — исследование и моделирование русловых процессов в нижних бьефах гидроузлов, математическое моделирование в гидродинамике и экологии. Автор более 90 публикаций, в том числе 5 монографий, 12 учебных пособий и патента РФ. E-mail: KuznetsovaYA@volgatech.net

UDC 532.591 (551.556.8)
DOI: 10.25686/2542-114X.2021.3.41

AUTOMATED CALCULATION OF PARAMETERS OF WIND-GENERATED WAVES IN THE WATER SURFACE OF RESERVOIRS

V. G. Kotlov, A. G. Pozdeev, Yu. A. Kuznetsova
Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola)

Wind-generated waves in the water surface of reservoirs affect the reliable operation of hydraulic structures.

Determining the structural response to the wave load is necessary to calculate the strength of hydrosystem structures. The wave load has a dynamic nature and increases the stress in hydraulic structures, which can cause their destruction during a long period of operation.

Assessment of parameters of wind-generated waves, which affect the water force action on hydraulic structures submerged in water reservoirs, is important to determine the stability and reliability of operation of hydrosystems. Therefore we automated the calculation of wind direction and velocity distributions in time based on the Weibull model in MathCad. This enabled us to plot changes in the wind direction and velocity in the Cheboksary hydrosystem water area, depending on a month. The initial data were processed based on a spline approximation of a velocity variation coefficient, a wave drift velocity, and a wave drift direction.

As a result, a surface wave pressure distribution was determined depending on the frequency at different wave velocities. The effect of a sinusoidal wave on the formation of forces supporting floating bodies was estimated. Geometric parameters of surface waves were calculated based on the solution of a second-order differential equation.

Keywords: reservoir; water surface; structural response; structure stability; wind-generated wave; wave drift; force action; Weibull model; wind velocity; pressure distribution; MathCad.

REFERENCES

1. Arfken G. *Matematicheskie metody v fizike* [Mathematical methods in physics]. Moscow: Atomizdat, 1970. 712 p.
2. Brebbia K., Walker S. *Dinamika morskikh sooruzhenij* [Dynamics of marine structures]. Leningrad: Shipbuilding, 1980. 230 p.
3. Lavrent'ev M. A., Shabat B. V. *Problemy gidrodinamiki i ih matematicheskie modeli* [Problems of hydrodynamics and their mathematical models]. Moscow : Nauka, 1973. 408 p.
4. Lighthill J. *Volny v zhidkostyah* [Waves in liquids]. Moscow : Mir, 1981. 600 p.
5. Pozdeev A. G., Kuznetsova Yu. A. *Ocenka razmyva nizhnego b'efa gidrouzla na osnove metodov tehnikeskoj diagnostiki i proizvodstvennykh funkcij* [Evaluation of erosion of the lower pool of the hydroelectric complex based on methods of technical diagnostics and production functions]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstrukcii. Tehnologii* [Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies], 2021, № 1, pp. 36–46.
6. Porshnev S. V. *Komp'yuternoe modelirovanie fizicheskikh sistem s ispol'zovaniem paketa MathCAD : uchebnoe posobie* [Computer modeling of physical systems using the MathCAD package: a tutorial], 2nd ed., add. Moscow : Hotline – Telecom, 2011. 320 p.
7. Sedov L. I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similarity methods and dimensions in mechanics]. Moscow : Nauka, 1972. 375 p.
8. Semenenko M. G. *Matematicheskoe modelirovanie v MathCad* [Mathematical modeling in MathCad]. Moscow : Altex-A, 2003. 208 p.
9. Sretensky L. N. *Teoriya volnovykh dvizhenij zhidkosti* [Theory of fluid motion]. Moscow : Nauka, 1977, pp. 54–60.

Information on authors

KOTLOV Vitaly Gennadievich — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Civil Engineering and Water Supply Department, Director of the Institute of Construction and Architecture of the Volga State University of Technology, Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Yoshkar-Ola. Research interests: connections of elements of wooden structures; heat and mass transfer. Author of 128 scientific and methodical works, including 3 monograph, 6 learning aids, 8 author's certificates and patents of the Russian Federation, and 13 useful model patents. KotlovVG@volgatech.net

POZDEEV Anatoly Gennadievich — Doctor of Engineering, Professor, Professor of Civil Engineering and Water Supply Department, Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN), Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests: research and modeling of channel processes in hydrosystem tailraces, mathematical modeling in hydrodynamics and ecology, automation of calculation of water, gas and heat supply systems in construction. Author of more than 100 scientific works, including 10 monographs, 13 textbooks, 11 patents and inventor's certificates. E-mail: PozdeevAG@volgatech.net

KUZNETSOVA Yuliya Anatolievna — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Civil Engineering and Water Supply Department, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests: research and modeling of channel processes in hydrosystem tailraces, mathematical modeling in hydrodynamics and ecology. Author of 91 scientific and methodical works, including 5 monographs, 12 learning aids and patent of the Russian Federation. E-mail: KuznecovaYA@volgatech.net.

Библиографическая ссылка

Котлов В. Г., Поздеев А. Г., Кузнецова Ю. А. Автоматизация вычисления параметров ветровых волн, развивающихся на акватории водохранилищ // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. — 2021. — № 3 (19). — С. 41–50. — DOI: 10.25686/2542-114X.2021.3.41.