ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СОФИЯ

Том Volume 59 2026 Брой Issue 3

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY SOFIA

DOI: 10.71167/uaceg.2026.590304

*Получена: 02.10.2025 г.*
*Приета: 04.02.2026 г.*

# ПРОГНОСТИЧЕН МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ВЕТРОВО ВЪЛНЕНИЕ В ГОЛЕМИ ВОДНИ БАСЕЙНИ

**Г. Вълков[1], Н. Йорданов[2], Ю. Стоименов[3]**

***Ключови думи:*** *прогнозиране на ветрови режим, Гумбелово разпределение, ветрови вълни, норми за проектиране, непреливаемост на короната на язовирна стена*

## РЕЗЮМЕ

Предложен е метод за прогнозиране на екстремните ветрови скорости, служещи за изчисляване на ветрово вълнение в големи водни басейни (морета, езера, язовири), с използване на статистически техники и Гумбеловото вероятностно разпределение. Разработени са *ad-hoc* изчислителни програми (на *MS Excel* и *Python*) за обработка на изходните данни и получаване на скоростите на вятъра по направления и многогодишна повторяемост с последващо определяне на вълновите параметри, съгласно съществуващите нормативи. Показан е примерен разчет на ветрово вълнение в язовир „Огняново“, като са използвани моделирани данни от Интернет платформата *MeteoBlue*, както и архивни данни от локална метеорологична станция на ДП „Управление и стопанисване на язовири“, инсталирана до водохранилището.

Настоящата статия ще е от практическа полза за проектанти на хидротехнически съоръжения, студенти по съответната специалност и изследователи на вълнови процеси.

[1] Георги Вълков, д-р инж., ДП „Управление и стопанисване на язовири“, ул. „Лъчезар Станчев“ 9, София 1000, https://dpusia.bg, e-mail: georgi_valkov@dpusia.bg
[2] Николай Йорданов, ДП „Управление и стопанисване на язовири“, ул. „Лъчезар Станчев“ 9, София 1000, e-mail: nikolai_yordanov@dpusia.bg
[3] Юли Стоименов, ДП „Управление и стопанисване на язовири“, ул. „Лъчезар Станчев“ 9, София 1000, e-mail: yuli_stoimenov@dpusia.bg

## 1. Въведение

При проектирането на хидротехнически съоръжения, изпълнени в обширни водни басейни (морета, езера, реки, водохранилища), такива като вълноломи, буни, язовирни стени, преградни диги и пр., едно от основните външни въздействия (натоварвания) върху тях е ветровото вълнение. За изчисление на същото с изискуемата нормативна обезпеченост (многогодишна повторяемост) са необходими извадки от данни за вълнението или за ветровия режим в района на съоръжението за изминал период от време (архивни данни или моделни симулирани резултати), поне за няколко изминали последователни години. При липса на вълнови данни (най-вероятният сценарий в инженерната практика) се използват ветрови такива, от които се намира скоростта на вятъра с нужната обезпеченост, като последващите изчисления на вълнението са регламентирани с действащите у нас „Норми за натоварвания и въздействия на хидротехнически съоръжения от вълни, лед и плавателни съдове“ [1].

Главните вълнообразуващи фактори при генериране на ветрови вълни са скоростта на вятъра, продължителността на ветровото въздействие и ветровият разгон (***ветрови*** или ***вълнови разгон*** е отсечката от повърхността на водния басейн, върху която действа вятърът, предизвикващ вълнение; за разгон се взема обикновено най-дългото праволинейно разстояние върху откритата водна площ между брега на водоема и разчетната точка в него). Въз основа на тези три фактора, се определят *средната височина*, *средният период* и *средната дължина* на вълните (чл. 16 и чл. 17, [1]). При изчисляване на устойчивостта и носещата способност на хидротехническите съоръжения се търси височината на вълните с нормативната им обезпеченост в системата, съгласно същите нормативи (чл. 7 и чл. 21, [1]).

## 2. Анализ на ветровите данни

За определяне на разчетните вълнови параметри е достатъчно да имаме статистически данни за вълнението през един по-дълъг изминал времеви период, напр. няколко последователни години (поне три, според [2]). За съжаление, в инженерната практика рядко се среща такава ситуация – в най-добрия случай могат да се получат архивни данни за ветровия режим в района от близко разположени метеорологични станции, които следва да се обработят с различни статистически техники за получаване на екстремните ветрови скорости, необходими за определяне на ветровите вълни. Един от препоръчваните методи е да се използва вероятностното Гумбелово разпределение (*Gumbel distribution*, наричано още *Fisher-Tippett I* или *FT-I* разпределение) [2], чиято кумулативна функция на разпределение *cdf* (*cumulative distribution function*) се задава като:

$$cdf = e^{-e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)}}, \tag{1}$$

където $A$ и $B$ са коефициенти (на формата и мястото);

$x$ – неизвестна величина.

Неизвестната $x$ може да бъде скорост на вятъра, височина на вълната и пр., в зависимост от разглеждания природен феномен (вятър, вълнение). При обработка на ветрови данни ще използваме символа $U$ за скорост на вятъра вместо $x$.

Ако с $\mu$ и $\sigma$ означим съответно средноаритметичното и средноквадратичното (стандартното) отклонение на извадката с данни за търсената величина, то за коефициентите $A$ и $B$ са изведени следните зависимости [2]:

$$A = \frac{\sqrt{6}}{\pi}\sigma = 0,779\sigma, \tag{2}$$

$$B = \mu - \gamma\frac{\sqrt{6}}{\pi}\sigma = \mu - 0,45\sigma, \tag{3}$$

($\gamma$ е Ойлерова константа, равна на 0,5772…).

Вероятността за превишение на екстремната ветрова скорост $U$ за период на повторяемост $T_r$ години е:

$$Pr.Exc = \frac{1}{N_{ev.y}.T_r}, \tag{4}$$

където $N_{ev.y}$ е броят на годишните събития (регистрациите на ветровите скорости) при ежедневни регулярни записи:

$$N_{ev.y} = \frac{24}{t}365, \tag{5}$$

където $t$ е дневен интервал на регистрацията (събитието) в часове.

След двукратно логаритмуване на уравнение (1) и преобразувания получаваме:

$$U = B - A.\ln\left[-\ln\left(cdf\right)\right]. \tag{6}$$

Взаимовръзката между кумулативната функция на разпределение и вероятността за превишение е известна от статистиката:

$$cdf = 1 - Pr.Exc. \tag{7}$$

От (6) и (7) следва:

$$U = B - A.\ln\left[-\ln\left(1 - Pr.Exc\right)\right]. \tag{8}$$

Имайки достатъчно надеждна (дълга) редица от ветрови данни, по формули (1) ÷ (8) можем да получим екстремните скорости на вятъра за бъдещ период на повторяемост (напр. 50 или 100 години), в зависимост от класа и вида на проектното съоръжение.

По гореописания начин се намира скоростта на вятъра с нужната обезпеченост (повторяемост) за всички посоки (без да се конкретизира посоката на вятъра). Решението обаче се усложнява в известна степен, ако искаме да разделим ветровите скорости и по географска посока (4-румбова, 8-румбова или 16-румбова скала на компаса). В подобен случай трябва да се раздели цялостната извадка на сектори (напр. Север (С), Североизток (СИ), Изток (И) по 8-румбовата скала) и търсените величини във формули (1) ÷ (8) да се определят за всяка подизвадка, при което броят на годишните събития за всеки сектор от формула (5) ще се умножи с процентното отношението на регистрациите само за дадения сектор към общия брой регистрации. Ако в регистрираните данни се срещат нулеви скорости (или много близки до тях), това са моменти на безветрие (затишие), които трябва да се извадят от броя на регистрациите (събитията) с вятър за всеки сектор (по скалата на Бофорт за безветрие се приемат скорости на вятъра под 0,3 m/s); при това общият брой на регистрациите ще продължава да включва и тези с безветрие.

## 3. Определяне на ветровите скорости с нормативна обезпеченост

При проектиране на язовири и преградни диги е необходимо да се провери непреливаемостта на съоръженията при ветрово вълнение, т.е. да се изчисли пълзенето на вълните по откоса. Такова въздействие предизвиква колебания на водната повърхност, което, в екстремни случаи, може да причини прехвърляне на водни маси през билото на съоръжението, а в случая на насипни стени/диги – да доведе до разрушение с катастрофални последици – материални щети, унищожаване на земеделски култури, добитък или човешки жертви. Нормативните изисквания при подобни проверки са формулирани в [3]. Ветрови архивни данни могат да се получат от регионални метео-станции (или централно от Националния институт по метеорология и хидрология, НИМХ), както и от някои специализирани интернет платформи (напр. *MeteoBlue*).

### 3.1. Метеорологична станция на язовир „Огняново“

За изследване на климатични данни за язовир „Огняново“, намиращ се под управление на Държавно предприятие „Управление и стопанисване на язовири“ (ДПУСЯ), на място е инсталирана метеорологична станция „Bresser” (фиг. 1); същата регистрира основни данни за валежи, температура на въздуха, посока и направление на ветровете и пр., предавайки информацията в реално време. Инструментите за измерване показват климатичните параметри на екран и имат вградена Wi-Fi връзка, както и възможност да изпращат регистрираните метеорологични данни към облачен сървър. С помощта на уеб браузър, инсталиран на компютър или на мобилен телефон, може да се получи достъп до местна метеорологична прогноза и данни за конкретното място.




**Фиг. 1. Метеостанция „Bresser” (външен вид)**

След инсталирането на метеостанцията на стената на язовира, ДПУСЯ е събрало данни за периода от 14.08.2023 г. до 21.06.2025 г. (с няколко по-продължителни прекъсвания по технически причини). Данните включват датата и времето на регистрация (с регулярен интервал на записа през 5 минути), азимута в градуси на ветровата посока и скоростите на вятъра – моментна, осреднена на всеки 10 минути, както и поривите на вятъра (англ. *gust*). Данните са съхранени в облачното пространство, откъдето са изтеглени в *.CSV формат и конвертирани в *MS Excel* в следния табличен вид:

**Таблица 1. Данни от метеостанцията на яз. „Огняново“**

| Time | Wind Direction, deg | Wind speed, m/s | 10 min AVG, m/s | Wind gust, m/s |
|---|---|---|---|---|
| Monday, August 14, 2023 3:00 AM EEST | 1 | 1,2 | 0,6 | 1,2 |
| Monday, August 14, 2023 3:05 AM EEST | 22 | 1,1 | 0,9 | 1,1 |
| Monday, August 14, 2023 3:10 AM EEST | 34 | 1,6 | 1,1 | 1,6 |
| … | … | … | … | … |
| Saturday, June 21, 2025 10:50 AM EEST | 317 | 0,9 | 1,2 | |

За обработка на входните данни сме създали специална програма (*ad-hoc*), написана на *Python 3*, която прочита *Excel* таблицата и групира градусите по 16 географски посоки (Север, Север-Североизток, Североизток и т.н.). Програмата добавя нова колонка към таблицата с географските посоки (означени с английската им нотация: *N*, *NNE*, *NE*, …), според азимута на всеки индивидуален запис (напр. посока 1° попада в сектор Север или *N*). След това програмата групира ветровите скорости към всеки съответен сектор (за такива са приети осреднените на 10 минути скорости – колонка „10 min AVG“ от таблица 1). При наличие на тези 16 подизвадки, за всяка от тях се изчисляват средната аритметична стойност и средното квадратично отклонение, а от тях – и всички необходими параметри по формули (1) ÷ (8) за отделните подизвадки. Регистрациите на безветрие се изваждат от данните за ветровите скорости за всички географски посоки, но техният брой остава включен в общия брой регистрации за цялостната извадка (в нашия случай 136521 записа). Като краен резултат от изчисленията се получават екстремалните скорости на вятъра по Гумбеловото разпределение за зададени периоди на повторяемост $T_r$ (2, 20, 50 години). Резултатите от изчисленията са представени в таблица 2.

**Таблица 2. Екстремални скорости на вятъра по посоки за различни периоди на повторяемост за яз. „Огняново“ (изчислени по данни на ДПУСЯ)**

| $T_r$ | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| years | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s |
| 2 | 6,2 | 5,4 | 5,3 | 5,4 | 6,0 | 7,6 | 9,2 | 8,3 |
| 20 | 7,5 | 6,6 | 6,3 | 6,4 | 7,2 | 9,1 | 11,0 | 10,1 |
| 50 | 8,1 | 7,1 | 6,7 | 6,8 | 7,6 | 9,7 | 11,8 | 10,8 |

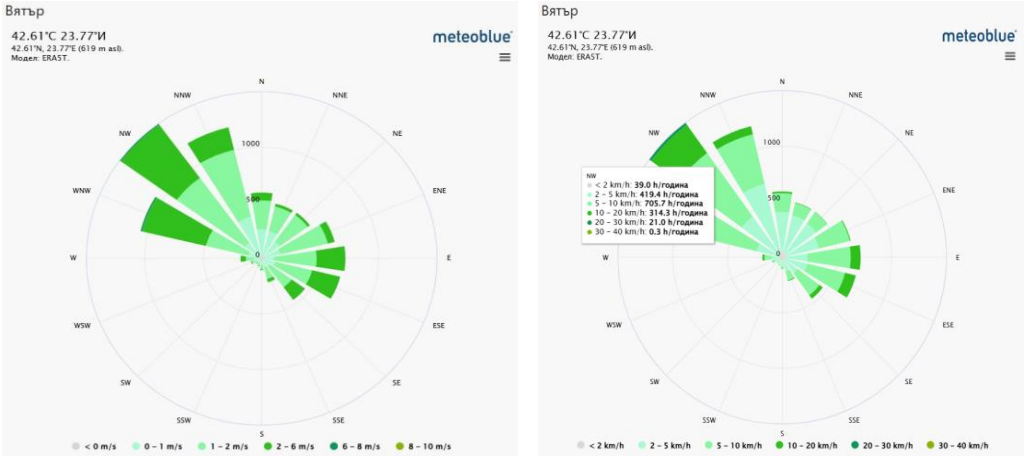
| $T_r$ | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| years | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s |
| 2 | 7,1 | 8,1 | 8,0 | 8,4 | 10,0 | 10,7 | 8,9 | 7,2 |
| 20 | 8,8 | 10,0 | 9,9 | 10,3 | 12,2 | 12,9 | 10,8 | 8,7 |
| 50 | 9,5 | 10,8 | 10,6 | 11,1 | 13,0 | 13,8 | 11,6 | 9,3 |

### 3.2. MeteoBlue

Интернет платформата *MeteoBlue*, разработена от Университета в Базел, Швейцария, предоставя детайлни прогнози за времето и климатични данни за всяка точка на Земята. Платформата предлага също ветрови данни, използвайки изчислителни модели, като услугите ѝ са достъпни чрез техния уебсайт, мобилни приложения и различни API интерфейси. Моделът ERAST, използван от *MeteoBlue*, моделира данни за климата, като взема голямо количество исторически и текущи метеорологични наблюдения от съответния регион и ги свързва в симулацията на модела, използвайки усъвършенствани статистически методи за точно представяне на състоянието на климата в даден момент или в исторически план.

Ние използвахме моделирани ветрови данни (т.нар. *hindcast*) за яз. „Огняново“, предоставени ни от платформата, за точка с географски координати 42,61° С 23,77° И: https://www.meteoblue.com/bg/%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE/historyclimate/climatemodelled/42.606N23.766E

Данните за ветровия режим в посочената географска точка се дават във вид на роза на ветровете, визуализираща честотата на проявление на ветровете по географска посока (по 16-румбовата скала), сортирани по групови скорости: 0 ÷ 1 m/s, 1 ÷ 2 m/s, 2 ÷ 6 m/s, 6 ÷ 8 m/s, 8 ÷ 10 m/s. Периодите на безветрие са означени като „< 0 m/s“, което не е точно (по-правилно би било ≈ 0 m/s). Броят на наблюденията за всеки подсектор е изразен в часове на годишна база, т.е. продължителност на вятъра за всяка географска посока и всяка групова скорост, изчислен сумарно за 1 година. Конкретните цифри за всеки подсектор се виждат при позициониране на курсора върху въпросната географска посока (вж. фиг.2*b*).




*a) роза на ветровете – общ вид*

*b) честота на проявление на груповите скорости за всяка географска посока*

**Фиг. 2. Роза на ветровете, изобразяваща честотата им на проявление по посоки и групови скорости (данни на *MeteoBlue*)**

Така получените данни са записани в *Excel* таблица (вж. табл. 3).

**Таблица 3. Данни за района на яз. „Огняново“ от *MeteoBlue***

| | Wind Speed Bins, m/s | | | | | Observations |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **0 – 1** | **1 – 2** | **2 – 6** | **6 – 8** | **8 – 10** | |
| **Direction** | **[h]** | **[h]** | **[h]** | **[h]** | **[h]** | **[h]** |
| **N** | 231,5 | 262,4 | 69,9 | 0 | 0 | 563,8 |
| **NNE** | 214,1 | 228,1 | 27,2 | 0 | 0 | 469,4 |
| **NE** | 169,3 | 298,1 | 23 | 0 | 0 | 490,4 |
| **ENE** | 132,7 | 416,4 | 60,8 | 0 | 0 | 609,9 |
| **E** | 80,2 | 367,1 | 246,9 | 0,3 | 0 | 694,5 |
| **ESE** | 91 | 324,5 | 248 | 0,3 | 0 | 663,8 |
| **SE** | 70,5 | 233,2 | 140,4 | 0,1 | 0 | 444,2 |
| **SSE** | 59,3 | 106 | 31,1 | 0,1 | 0 | 196,5 |
| **S** | 34,5 | 38,6 | 6,7 | 0,1 | 0 | 79,9 |
| **SSW** | 32 | 19,9 | 2,9 | 0 | 0 | 54,8 |
| **SW** | 27,2 | 16,6 | 4,3 | 0 | 0 | 48,1 |
| **WSW** | 36,1 | 31,6 | 8,3 | 0 | 0 | 76 |
| **W** | 40,4 | 77,5 | 44,9 | 0,2 | 0 | 163 |
| **WNW** | 89,4 | 375,6 | 561,1 | 14 | 0,5 | 1040,6 |
| **NW** | 158,3 | 720,4 | 589,8 | 10,5 | 0,6 | 1479,6 |
| **NNW** | 343,6 | 620 | 208,8 | 0,4 | 0 | 1172,8 |
| **CALM** | | | | | | **384,1** |
| sum: | 1 810 | 4 136 | 2 274 | 26 | 1 | **8631,4** |

*Забележка: CALM означава безветрие по скалата на Бофорт (Beaufort*).

Така изведените ветрови скорости обработваме с друга изчислителна програма (имаме я изпълнена в две версии – на конвенционалния софтуер *MS Excel* и на *Python*). В таблица 3 сумата на часовете (включващи и безветрието) трябва да е равна на броя на часовете за една година, т.е. 24 × 365,25 = 8766 (0,25 се добавят към 365 денонощия за обикновена година, ако се отчитат високосните години на всеки четири години). В конкретния случай сумата е 8631,4 часа годишно, което, по наше мнение, е резултат от неточност при закръгленията на дадените часове. Подобна неточност коригираме, като разхвърлим сумарната грешка (недостиг) за всяка подгрупа, съобразно нейната тежест в извадката, след което определяме процента на наблюдения (честотата на проявление) на всяка подгрупа спрямо крайната сума наблюдения (8766 часа). Така получените данни се явяват входни за изчислителната ни програма (вж. табл. 4).

**Таблица 4. Входни данни за изчисляване на екстремалните скорости на вятъра по Гумбеловото разпределение**

| | Wind Speed Bins, m/s | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Observations** | **0 – 1** | **1 – 2** | **2 – 6** | **6 – 8** | **8 – 10** |
| **Direction** | **[%]** | **[%]** | **[%]** | **[%]** | **[%]** | **[%]** |
| **N** | 6,53 | 2,6814 | 3,0393 | 0,8096 | – | – |
| **NNE** | 5,44 | 2,4799 | 2,6421 | 0,3151 | – | – |
| **NE** | 5,68 | 1,9610 | 3,4529 | 0,2664 | – | – |
| **ENE** | 7,06 | 1,5370 | 4,8231 | 0,7042 | – | – |
| **E** | 8,04 | 0,9289 | 4,2521 | 2,8598 | 0,0035 | – |
| **ESE** | 7,69 | 1,0540 | 3,7586 | 2,8726 | 0,0035 | – |
| **SE** | 5,15 | 0,8166 | 2,7011 | 1,6262 | 0,0012 | – |
| **SSE** | 2,28 | 0,6869 | 1,2278 | 0,3602 | 0,0012 | – |
| **S** | 0,93 | 0,3996 | 0,4471 | 0,0776 | 0,0012 | – |
| **SSW** | 0,63 | 0,3707 | 0,2305 | 0,0336 | – | – |
| **SW** | 0,56 | 0,3151 | 0,1923 | 0,0498 | – | – |
| **WSW** | 0,88 | 0,4181 | 0,3660 | 0,0961 | – | – |
| **W** | 1,89 | 0,4679 | 0,8977 | 0,5201 | 0,0023 | – |
| **WNW** | 12,05 | 1,0355 | 4,3505 | 6,4992 | 0,1622 | 0,0058 |
| **NW** | 17,14 | 1,8336 | 8,3443 | 6,8316 | 0,1216 | 0,0069 |
| **NNW** | 13,58 | 3,9799 | 7,1814 | 2,4185 | 0,0046 | – |
| CALM | 4,4726 | | | | | |
| ALL without CALM | 95,5274 | 20,9662 | 47,9068 | 26,3406 | 0,3012 | 0,0127 |
| ALL+CALM, % | 100,00 | | | | | |

При данните, взети от *MeteoBlue*, ветровите скорости са дадени като брой часове по групи и разпределени по географски посоки, а не като индивидуални данни, поради което средноаритметичното $\mu_{\text{sector}}$ и стандартното отклонение $\sigma_{\text{sector}}$ на всяка подизвадка (географска посока) се определя по приблизителни формули, отчитащи процентното отношение на отделните групови скорости към съответната подизвадка:

$$\mu_{\text{sector}} = \frac{\sum_i \left[ \bar{U}_i \left( p\% \right)_i \right]}{\left( q\% \right)_{\text{sector}}}, \tag{9}$$

$$\sigma_{\text{sector}} = \sqrt{\frac{\sum_i \left[ \left( \bar{U}_i - \mu_{\text{sector}} \right)^2 \left( p\% \right)_i \right]}{\left( q\% \right)_{\text{sector}}}}, \tag{10}$$

където $\bar{U}_i$ е средната скорост за дадения интервал на скоростите на вятъра (напр. 1,5 m/s за интервала 1 ÷ 2 m/s – вж. табл. 4);

$(p\%)_i$, % е процентът на проявление (честотата) на дадената подгрупа (напр. 3,0393 % за посока *N* за скоростния интервал 1 ÷ 2 m/s от табл. 4);

$(q\%)_{\text{sector}}$, % е процентът на проявление (честотата) на вятъра в дадената географска посока (напр. 6,53 % за посока *N* от табл. 4).

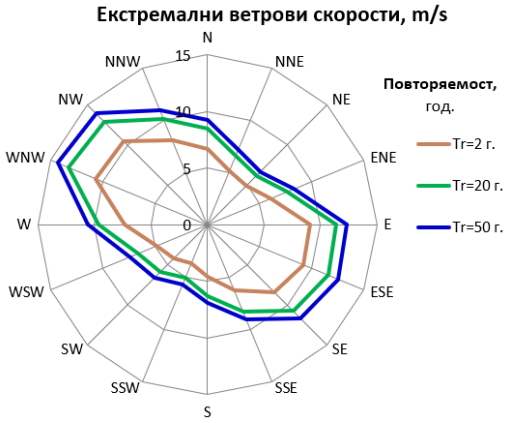
След намирането на средноаритметичното и стандартното отклонение за всяка посока се изчисляват и останалите величини по формули (1) ÷ (8). Резултатите от изчисленията са представени в табл. 5.

**Таблица 5. Екстремални скорости на вятъра по посоки за различни периоди на повторяемост за яз. „Огняново“ (изчислени по данни на *MeteoBlue*)**

| Tr | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| years | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s |
| 2 | 6,7 | 5,2 | 4,9 | 6,1 | 9,1 | 9,2 | 8,4 | 6,3 |
| 20 | 8,5 | 6,6 | 6,1 | 7,6 | 11,4 | 11,6 | 10,7 | 8,2 |
| 50 | 9,3 | 7,2 | 6,6 | 8,3 | 12,3 | 12,6 | 11,7 | 9,0 |

| Tr | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| years | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s | m/s |
| 2 | 4,6 | 3,7 | 4,2 | 4,9 | 7,3 | 10,7 | 10,4 | 8,1 |
| 20 | 6,3 | 5,1 | 5,9 | 6,7 | 9,6 | 13,3 | 12,9 | 10,1 |
| 50 | 6,9 | 5,7 | 6,6 | 7,4 | 10,6 | 14,3 | 13,9 | 10,9 |

Получените ветрови скорости могат да бъдат представени и като роза на ветровете в зависимост от географските посоки и периодите на повторяемост – вж. фиг. 3.




**Фиг. 3. Роза на ветровете, изобразяваща екстремалните ветрови скорости за различни години на повторяемост (изчислена по данни на *MeteoBlue*)**

*Забележка: При вятър и вълнение означените географски посоки са тези, откъдето идват ветровете/вълните*

## 4. Изчисление на ветрови вълни

Въз основа на скоростите на вятъра по посоки с желаната обезпеченост (многогодишна повторяемост), получени по гореописания метод (или по друг подходящ начин), можем да изчислим параметрите на разчетната вълна за проектното съоръжение. У нас тази процедура е регламентирана с нормативния документ [1]. Това ще покажем с пример за проверка на непреливаемостта на короната на яз. „Огняново“ съобразно изискванията.

### 4.1. Определяне на вълновите параметри в петата на язовирната стена

Съгласно „Норми за проектиране на насипни язовирни стени“ [3] определянето на надвишението на билото (короната) на язовирна стена над изчислителното водно ниво зависи от вълнението в езерото, предизвикващо пълзене на вълната по водния откос (чл. 33).

Вълнението в язовирните езера се причинява основно от действието на вятъра, като най-високите ветрови вълни се генерират по главната вълноопасна посока – тази, която има най-голям вълнови разгон, чийто лъч е приблизително перпендикулярен на съоръжението (на оста на язовирната стена). При формирането си ветровата вълна преминава през различни дълбочинни зони на езерото: начална – на нейното зараждане и развитие, където наклонът на дъното се изменя плавно, и финална – на разрушаване на вълната над водния откос на язовирната стена, с рязка промяна на дълбочината на дъното. Разделната точка между двете зони в план е петата на водния откос, пресечена от лъча на избраната вълноопасна посока. От своя страна, началната зона може да бъде дълбоководна, където дъното не влияе на вълновите характеристики, и плитководна, където дъното променя тези характеристики. Условието за наличие на дълбоководие е ([1], чл. 6):

$$\begin{cases} H > 0,5\bar{\lambda}_g - \text{дълбоководие;} \\ H \le 0,5\bar{\lambda}_g - \text{плитководие,} \end{cases} \qquad (11)$$

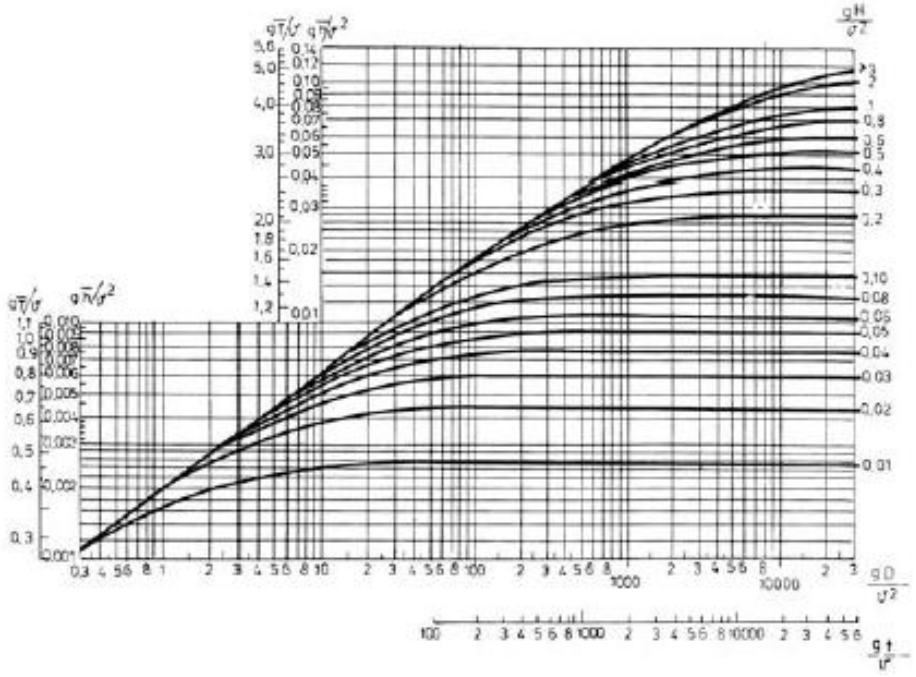
където $H$ е дълбочината на водата в дадената точка;

$\bar{\lambda}_g$ – средната дължина на вълната в дълбока вода ($g$ – индекс за дълбоководие).

При определяне на основните вълнови характеристики (височина, дължина и период на вълната) за дадена дълбочина може да имаме само дълбоководни параметри или и двата типа – дълбоководни и плитководни, ако търсената точка е в плитководната зона.

При изчисляване на вълновите параметри на дълбока вода по нормативите [1], чл. 16, се използват номограми (фиг. 4), в които входни данни са безразмерните величини: разгонът $\frac{g.D}{v^2}$, времетраенето на вятъра, генериращ вълнението $\frac{g.t}{v}$, и дълбочината на водата $\frac{g.H}{v^2}$ в разчетната точка ($v$ е изчислителната скорост на вятъра, m/s; $D$ – ветровият/вълновият разгон, m; $t$ – продължителност на вятъра с постоянна скорост и посока, s; $g$ = 9,81 m/s$^2$ е земното ускорение – да се разграничава от индекса за дълбоководие, приет в (11)). По тези входни параметри се определят от номограмата две двойки безразмерни отношения (едната – за безразмерните разгон и дълбочина, и втората

– за времетраенето и дълбочината): $\frac{g.\bar{h}}{v^2}$ и $\frac{g.\bar{T}}{v}$ (при известно изначално $v$), като за окончателна се взема двойката с по-малките стойности, от която се намират средната височина $\bar{h}$ и средният период $\bar{T}$ на разчетната вълна.



**Фиг. 4. Номограма за определяне на параметрите на ветровите вълни, [1]**

Следва да се отбележи, че ако разчетната точка е в дълбоководието, то кривата $\frac{g.H}{v^2}$ ще съвпада с горната обвивна крива на номограмата за съответния аргумент от абсцисата – разгона $\frac{g.D}{v^2}$ или времетраенето $\frac{g.t}{v}$; в случай на плитководие – търсените параметри $\frac{g.\bar{h}}{v^2}$ и $\frac{g.\bar{T}}{v}$ ще се отчитат за съответната стойност на кривата $\frac{g.H}{v^2}$ (или за интерполираното значение между две съседни криви). В цитираните нормативи поясненията са дадени само за дълбоководната зона, като средните височина и дължина на вълната са означени с индекса $g$ (предполага се, но не се упоменава изрично, че средният период на вълната остава непроменен при прехода от дълбоководие към плитководие).

След намирането на средния вълнови период $\bar{T}$ се определя и средната дължина на вълната в дълбоководието $\bar{\lambda}$ по чл. 17 на [1]. Наличието или отсъствието на индекса $g$ в символите на основните параметри на вълната (височина, период и дължина) зависи от това дали същите се отнасят за дълбоководната или плитководната зона, т.е. от удовлетворяването на условие (11) за разчетната точка.

При проверка на непреливаемостта на котата на билото на язовирна стена е необходимо да се изчисли и височината на вълната с 1 % обезпеченост в системата – това става от друга номограма (чл. 21 (1), [1]). Следва да отбележим, че при изчисляване на вълнението се различават два вида обезпеченост – режимна и системна. *Режимната обезпеченост* или *многогодишната вероятност за превишение* е свързана с повторяемостта на събитието (екстремната вълна) веднъж на $n$ години в многогодишен ред на наблюдения, изразена в процента на вероятността на превишение на вълновите параметри в даден брой години: 2, 20, 50. Така например, височина на вълна с режимна обезпеченост 5 % означава най-вероятната височина на вълните, която се среща в 5 % от всички случаи на наблюдения за разглеждания период, или веднъж на 20 години (1/20 = 5 %) [5]. От друга страна, *обезпечеността в системата* (системната обезпеченост) на параметрите на вълната (височината $h$, периодът $T$ или дължината $\lambda$) се определя в регистрирана/изследвана система вълни (не по-малко от 100), изразена в процента на броя вълни, чиято числова стойност не е по-малка от тази на останалите вълни в редицата, преминаващи непосредствено една след друга през дадена точка от акваторията. Системната обезпеченост се означава с индекса $i$ % към съответния символ на вълновия параметър [6], напр., височина на вълната с 1 % обезпеченост в системата е $h_{1\%}$; т.е. при регистрирани 1000 вълни, $h_{1\%}$ = 2,0 m означава, че десетте най-високи вълни ще имат височина, не по-ниска от 2 m.

След намирането на височината на вълната с 1 % обезпеченост в системата в петата на водния откос на язовирната стена, се преминава към определянето на пълзенето на вълната по откоса (наричано още в хидротехническата практика вълнови *накат*), съгласно чл. 57 (1) на нормативa [1].

## 4.2. Алтернативен подход

Трудностите на гореописаната нормативна методика са сложността и неточността на отчитане по четири координатни оси (по две за абсцисната и за ординатната), изобразени в логаритмичен мащаб и интерполирането между семейство криви. За да се избегнат подобни затруднения, могат да се ползват алтернативно формулите, по които са построени номограмите, публикувани в [4].

Средната височина на вълната в дълбоководието, определена по ветровия разгон, е намерена като:

$$\bar{h}_{gD} = 0{,}16\frac{v^2}{g}\left[1-\left(\frac{1}{1+6.10^{-3}\sqrt{\frac{g.D}{v^2}}}\right)^2\right]. \qquad (12)$$

Средната височина на вълната в дълбоководието, определена по продължителността на ветровото действие:

$$\bar{h}_{gt} = 0{,}16\frac{v^2}{g}\left\{1-\left[\frac{1}{1+1{,}04.10^{-3}.\left(\frac{g.t}{v}\right)^{0{,}625}}\right]^2\right\}. \qquad (13)$$

Окончателната средна височина на вълната в дълбоководието е:

$$\bar{h}_g = \min\left(\bar{h}_{gD}, \bar{h}_{gt}\right). \tag{14}$$

Средният период на вълната в дълбоководието се изчислява като:

$$\bar{T}_g = 6,2\pi \frac{v}{g}\left(\frac{g.\bar{h}_g}{v^2}\right)^{0,625}, \tag{15}$$

а средната дължина на вълната в дълбоководието:

$$\bar{\lambda}_g = \frac{g}{2\pi}\bar{T}_g^{\,2}. \tag{16}$$

Височината на вълните с *i*-процентна обезпеченост в системата в дълбоководието е дадена в нормативата [1], чл. 21 (1), като:

$$h_{gi} = K_{gi}.\bar{h}_g, \tag{17}$$

където $K_{gi}$ е коефициентът на преход към $i$ % обезпеченост на вълната в системата, определящ се по приложената към съответния член номограма. Затрудненията с графичното определяне на коефициенти бяха изказани по-горе, затова ще дадем формулите, по които е получена графиката [6]:

$$\varphi_g = \frac{500}{\sqrt{\frac{gD}{v^2}} + 390}, \tag{18}$$

където $\varphi_g$ е коефициент от разпределението на Вейбул, за който е прието условието $\varphi_g \geq 1$ (ако по (18) се получи $\varphi_g < 1$, приема се $\varphi_g = 1$);

$$K_{gi} = \Gamma^{-1}\left(\frac{1}{2.\varphi_g} + 1\right).\left[-\ln(i)\right]^{\frac{1}{2.\varphi_g}}, \tag{19}$$

където $\Gamma$ е гама-функция,

$i$ – процентна обезпеченост на вълната в системата, зададена като десетично число (1 % = 0,01).

Окончателно, височината на вълната с 1 % системна обезпеченост в дълбоководието се изчислява по формулите (17) ÷ (19) за $i$ = 0,01.

Ако разчетната точка е разположена в плитководието, според условие (11) може аналогично да се определят вълновите параметри по [4]. При наклони на дъното (по вълновия разгон), по-малки от 0,002, и при отрицателни наклони (когато дълбочината на водоема се увеличава по посока на придвижване на вълната, което е най-често срещано в язовирните езера) средната височина на вълната в плитководието се дава с формулата:

$$\bar{h} = \bar{h}_g.\tanh\left[\frac{0,1.\left(\frac{g.H}{v^2}\right)^{0,8}}{\frac{g.\bar{h}_g}{v^2}}\right], \tag{20}$$

където tanh() е хиперболичен тангенс (вълновите параметри в плитководието са без индекс).

Средният период на вълната в плитководието е даден като:

$$\bar{T} = 6,2\pi \frac{v}{g}.\left(\frac{g.\bar{h}}{v^2}\right)^{0,625}, \tag{21}$$

а средната дължина на вълната в плитководието:

$$\bar{\lambda} = \frac{g}{2\pi}\bar{T}^2. \tag{22}$$

Коефициентът на преход към $i$ % обезпеченост на вълната в плитководието се изчислява по формулите:

$$\varphi_H = \frac{500}{\sqrt{\frac{1,2.10^4\, gH}{v^2}} + 390}, \tag{23}$$

$$K_{Hi} = \Gamma^{-1}\left(\frac{1}{2.\varphi_H} + 1\right).\left[-\ln(i)\right]^{\frac{1}{2.\varphi_H}}, \tag{24}$$

като за краен коефициент на преход по обезпеченост в плитководието се приема по-малкият от двата намерени коефициента: $K_{gi}$ и $K_{Hi}$ (чл. 25 (4), [1]):

$$K_i = \min\left(K_{gi}, K_{Hi}\right). \tag{25}$$

Височината на вълната с $i$ % обезпеченост в плитководието се намира по формула (26):

$$h_i = K_i\bar{h}. \tag{26}$$

Горепредложените формули могат удобно да се програмират, дори и в средата на конвенционен софтуер като *Excel*, *MathCAD* и др., с което ще се избегне трудоемкостта и неточностите (грешките) при отчитането от номограми и таблици. Автоматизирането на изчислителния процес е добра алтернатива, даваща бързина и улеснение, и е стандартна практика в компютъризираното ни съвремие.

Заслужава да се отбележи, че действащите у нас нормативи [1] са от 1988 година и не отчитат нито последващите изследвания на вълнението за изминалите десетилетия, нито днешното ни насищане със софтуерни средства и изчислителни инструменти в инженерната сфера. В този аспект, актуализирането на „Норми за натоварвания и въздействия на хидротехнически съоръжения от вълни, лед и плавателни съдове“ се явява належаща задача за хидроинженерите и специалистите в страната.

### 4.3. Изчисление на вълнението във водохранилище „Огняново“

При проверка на непреливаемостта на короната на язовирни стени трябва да намерим височината на пълзенето на вълните по откоса, чиято формула е дадена в чл. 57 (1) на [1]. Целият процес на изчисленията на вълнението е реализиран в друга наша изчислителна програма, разработена в средата на *MS Excel*. Резултатите от изчисленията

на вълнението в яз. „Огняново“ за случая на най-високо работно водно ниво, НВРВН (чл. 33, [3]), са представени по-долу.

### 4.3.1. Входни данни

Параметри на язовирната стена:
– категория: I-ва (по ЗУТ), клас: I-ви (по [7]);
– кота корона: 629,00 m;
– НВРВН: 626,00 m;
– кота пета воден откос: ~ 587 m;
– воден откос: ~ 1:3 (променлив: 1:2,75 от кота 629,00 до кота 602,50 и 1:3,25 от кота 602,50 до дъното);
– височина на стената (измерена по вертикалната ос на короната): 44 m.
*Забележка: Котите са в Балтийска височинна система.*

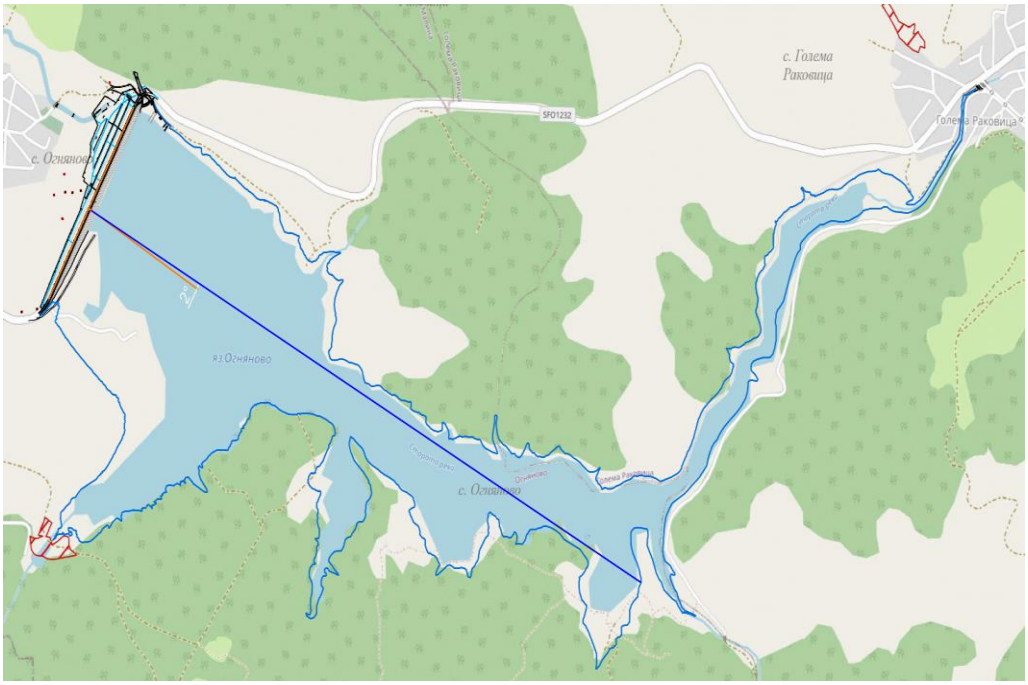
Вълнообразуващи фактори:
– вълноопасна посока: юг-югоизток (ЮЮИ), 152° азимут;
– ветрови/вълнови разгон: 3 170 m (вж. фиг. 5);
– скорост на вятъра с обезпеченост 2 % (за 1-ви клас съоръжения): 10,8 m/s (по данни на ДПУСЯ – вж. табл. 2).
*Забележка: 2 % обезпеченост на вятъра е равнозначна на 2 % многогодишна вероятност за превишение (режимна обезпеченост) на вълната.*

От тези входни данни определяме дълбочината на дъното в петата на водния откос:

$$H = \text{НВРВН} - \text{кота пета воден откос} = 39 \text{ m}$$

и приемаме средно заложение на водния откос:

$$m_\alpha = \cot(\alpha) = 3.$$




**Фиг. 5. Изчислителен вълнови разгон за яз. „Огняново“**

### 4.3.2. Резултати

*Excel* програмата ни изчислява следните величини:

– средна височина на вълната в дълбоководието: $\bar{h}_g$ = 0,32 m;

– среден период на вълната в дълбоководието: $\bar{T}_g$ = 2,26 s;

– средна дължина на вълната в дълбоководието: $\bar{\lambda}_g$ = 7,96 m;

– дълбоководна зона;

– коефициент на преход към 1 % обезпеченост на вълната в дълбоководието: $K_{g1\%}$ = 2,1;

– височина на вълната с 1 % обезпеченост в системата: $h_{g1\%}$ = 0,68 m;

– коефициент на грапавината на откоса: $K_\Delta$ = 1,0 (за бетонни плочи);

– коефициент на проницаемостта на откоса: $K_n$ = 0,9 (за бетонни плочи);

– коефициент, зависещ от заложението на откоса и скоростта на вятъра: $K_c$ = 1,13;

– коефициент, зависещ от заложението на откоса и полегатостта на вълната: $K_{нг}$ = 1,37;

– коефициент за обезпеченост на пълзенето на вълната: $K_i = K_{1\%}$ = 1,0;

– коефициент, зависещ от ъгъла между фронта на вълната и съоръжението: $K_\beta$ = 1,0 (за $\beta$ = 2°).

Окончателно, за височината на пълзене на вълните по откоса намираме:

$$h_{ni} = 0{,}94 \text{ m}.$$

Горният резултат е получен при прогнозна скорост на вятъра $v_{2\%}$ = 10,8 m/s, изчислена по данни на метеостанцията на ДПУСЯ, инсталирана на язовирната стена. Аналогичен разчет е направен и с прогнозната скорост на вятъра $v_{2\%}$ = 9 m/s, изчислена по данни на *MeteoBlue* (вж. табл. 5); резултатът е

$$h_{ni} = 0{,}76 \text{ m}.$$

Окончателният избор на стойността на $h_{ni}$, която ще участва в по-нататъшната проверка на котата на билото на язовирната стена, остава на преценката на проектанта. При това следва да се оцени и представителността на изходните ветрови данни, т.е. доколко същите са достатъчни по обем и времево покритие, за да могат резултатите от екстремния анализ да се считат за надеждни. Данните, получени от локалната метеостанция на ДПУСЯ са за период от около 2 години, с регулярна регистрация на всеки 5 минути, но с известни прекъсвания от по десетина дни, по технически причини. Като правило, се препоръчва подобни данни да покриват цели години, за да се избегне сезонно отклонение (напр. зимни бури) и да са с продължителност от поне 2 – 3 години [2] при периодичен интервал на регистриране от 10 min до час. По тези критерии, регистрираните данни от ДПУСЯ не достигат необходимото качество. Що се касае до данните на *MeteoBlue*, те са моделирани (т.нар. *hindcast*) и се базират на архивни данни за няколко десетки години. Такива данни не съдържат допълнителни смущения („шум“) от измервателната апаратура, но могат да игнорират някои пикови стойности от кратките ветрови пориви (*wind gust*); последното обаче не е съществено при ветрово вълнение, защото за генериране на вълни е нужно продължително (няколкочасово) ветрово въздействие. В този аспект ветровите скорости, предоставени от услугата *MeteoBlue*, се оценяват като статистически по-надеждни изходни данни. Трябва да отбележим също, че рядко са налични данни за ветровия режим, регистрирани в близост до инженерното

съоръжение, поради което възможността да се ползват изходни данни от платформата *MeteoBlue* е една добра алтернатива.

## 5. Заключение

В настоящата статия е разгледан процесът на изчисление на ветрово вълнение, съгласно действащите у нас нормативи. Предложен е метод за прогнозиране на екстремните ветрови скорости с необходимата нормативна обезпеченост, използващ статистически техники и Гумбеловото вероятностно разпределение. Даден е конкретен пример на разчет на вълнението в язовир „Огняново“, като са използвани изходни ветрови данни от два различни източника – от локална метеостанция, инсталирана на стената от ДПУСЯ и от метеорологичната платформа *MeteoBlue*, налична в Интернет; последният източник се явява особено полезен (понякога и единствена възможност) при липса на архивни (моделирани) ветрови данни (и вълнови такива) за изследвания район.

Също така, предложен е алтернативен подход за изчисляване на вълновите параметри по формули, вместо по нормативните номограми, което би улеснило и ускорило значително определянето на вълнението.

Обработката на данните и разчетите са реализирани чрез няколко изчислителни програми, разработени на *MS Excel* и *Python*.

Прогностичният метод за определяне на ветровите параметри за дадена многогодишна повторяемост на вятъра може да бъде използван като част от обследванията, проектирането и стопанската експлоатация на различни видове хидротехнически съоръжения, както и от специалисти по вълнови процеси в големи водни басейни – морета, езера, реки, водохранилища.

## БИБЛИОГРАФИЯ


1. Normi za natovarvaniya i vazdeistviya na hidrotehnicheski saorazheniya ot valni, led i plavatelni sadove. 1988, 2 07 02. Komitet po teritorialno i selishtno ustroistvo, Sofia.

2. *Thompson, E. F*. Hydrodynamic Analysis and Design Conditions. Coastal Engineering Manual, EM 1110-2-1100. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC. Pt. II Coastal Hydrodynamics, Ch. II-8, 2002.

3. Normi za proektirane na nasipni yazovirni steni. 1986, Byuletin za stroitelstvo i arhitektura, knizhki 1, 6.

4. Ukazaniya po razchetu nagruzok i vozdeistvii ot voln, sudov i l'da na morskie gidrotehnicheskie sooruzheniya, R31.3.07-01. Dopolnenie i utochnenie SNiP 2.06.04-82*, Moskva, 1995, 75 s.

5. Rezhim, diagnoz i prognoz vetrovogo volneniya v moryah i okeanah. pod red. E. S. Nesterov. Moskva, 2013.

6. *Lappo, D. D., Strekalov, S. S., Zavyalov, V. K.* Nagruzki i vozdeistviya vetrovih voln na gidrotehnicheskie sooruzheniya. Leningrad, 1990.

7. Normi za proektirane na hidrotehnicheski saorazheniya. Osnovni polozheniya. 1985.

# PROGNOSTIC METHOD FOR DETERMINING WIND-GENERATED WAVES IN LARGE WATER BASINS

**G. Valkov[1], N. Yordanov[2], Y. Stoimenov[3]**

***Keywords:*** *wind regime forecasting, Gumbel distribution, wind waves, design standards, non-overtopping of a dam crest*

## ABSTRACT

A method is proposed for forecasting extreme wind speeds, which are used to calculate wind-generated waves in large water bodies (seas, lakes, reservoirs), utilizing statistical techniques and the Gumbel probability distribution. Ad-hoc computational programs (in MS Excel and Python) have been developed to process the initial data and obtain wind speeds by direction and return periods with subsequent determination of wave parameters, according to the national regulations. A sample calculation of wind waves in the "Ognyanovo" reservoir is presented, using modelled data from the Internet platform *Meteoblue*, as well as archival data from a local meteorological station of the State-Owned Enterprise "Management and Stewardship of Dams", installed near the reservoir.

The present paper will be of practical use for design engineers of hydrotechnical structures, students in the relevant specialty, and researchers of wave phenomena.

[1] Georgi Valkov, Dr. Eng., State-Owned Enterprise "Management and Stewardship of Dams", 9 Lachezar Stanchev St., Sofia 1000, e-mail: georgi_valkov@dpusia.bg

[2] Nikolai Yordanov, State-Owned Enterprise "Management and Stewardship of Dams", 9 Lachezar Stanchev St., Sofia 1000, e-mail: nikolai_yordanov@dpusia.bg

[3] Yuli Stoimenov, State-Owned Enterprise "Management and Stewardship of Dams", 9 Lachezar Stanchev St., Sofia 1000, e-mail: yuli_stoimenov@dpusia.bg