



(06)-0102-0

## ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИВІВ ВІТРУ

**Ю.П. Некрасов<sup>а</sup>, А.В. Махінько<sup>б</sup>**

*<sup>а</sup>Донбаська національна академія будівництва і архітектури,  
вул. Державіна 2, 86123, м. Макіївка, Україна.*

*E-mail: yuri\_nekrasov@rambler.ru*

*<sup>б</sup>Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,  
пр. Першотравневий 24, 36011, м. Полтава, Україна.*

*E-mail: pasargada@mail.ru*

*Отримана 22 грудня 2005; прийнята 11 січня 2006*

**Анотація.** В статті наводиться алгоритм прямої статистичної оцінки локальних характеристик поривів швидкості вітру в приземному шарі атмосфери (амплітуди, тривалості, максимумів). Враховується нестационарний характер вітрового потоку та сильно виражена широкосмуговість турбулентних пульсацій. Застосування методики ілюструється на прикладах статистичної обробки експериментальних реалізацій швидкості вітру.

**Ключові слова:** пульсації швидкості вітру, пориви вітру, фактор пориву, амплітуда поривів, тривалість поривів, максимуми поривів.

## ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРЫВОВ ВЕТРА

**Ю.П. Некрасов<sup>а</sup>, А.В. Махінько<sup>б</sup>**

*<sup>а</sup>Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
ул. Державина 2, 86123, г. Макеевка, Украина.*

*E-mail: yuri\_nekrasov@rambler.ru*

*<sup>б</sup>Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,  
пр. Первомайский 24, 36011, г. Полтава, Украина.*

*E-mail: pasargada@mail.ru*

*Получена 22 декабря 2005; принята 11 января 2006*

**Аннотация.** В статье приведен алгоритм прямой статистической оценки локальных характеристик порывов скорости ветра в приземном слое атмосферы (амплитуды, длительности, максимумов). Учитывается нестационарный характер ветрового потока и сильно выраженная широкополосность турбулентных пульсаций. Применение предложенного алгоритма иллюстрируется на примерах статистической обработки экспериментальных реализаций скорости ветра.

**Ключевые слова:** пульсации скорости ветра, порывы ветра, фактор порыва, амплитуда порывов, длительность порывов, максимумы порывов.

## NUMERICALLY-ANALYTICAL METHOD OF THE STATISTICAL ESTIMATION OF THE WIND GUST FEATURES

Yu. P. Nekrasov<sup>a</sup>, A. V. Makhinko<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
Derzhavin str. 2, 86123, Makiyivka, Ukraine.*

*E-mail: yuri\_nekrasov@rambler.ru*

<sup>b</sup>*Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University  
Pershotravnevy pr. 24, 36011, Poltava, Ukraine*

*Received 22 December 2005; accepted 11 January 2005*

**Abstract.** In this article statistical estimation algorithm of wind gust local characteristics in internal atmospheric boundary layer (the amplitudes, duration, maximum) is presented. It is taken into account a non-stationary nature of wind flow and broad-banding of turbulent pulsation. Using of the offered method is illustrated on the example of the experimental data of statistical treating.

**Keywords:** velocities of wind pulsations, wind gusts, gust factor, gust amplitude, gust duration, gust maximum.

### Вступ

Пориви вітру, тобто різка короточасна зміна швидкості вітру (порядка декількох секунд), є одним з основних факторів, які визначають динамічний вплив приземного шару атмосфери на елементи будівельних конструкцій. Не випадково у зарубіжних стандартах фактор пориву  $G$  (gust-factor) є одним з найважливіших параметрів, який необхідно враховувати у процесі проектування [8-16]. Визначається фактор пориву статистикою відстеження екстремального значення швидкості вітру або швидкісного напору і покликаний представити турбулентні пульсації вітру у вигляді еквівалентного статичного навантаження

$$w_{eq} = G \cdot w_{0,max}^p = (1 + g\varepsilon_w)w_{0,max}, \quad (1)$$

де  $w_{0,max}$  – максимум середнього швидкісного напору за проміжок часу  $T$ , що дорівнює очікуваному терміну експлуатації конструкції;  
 $\varepsilon_w$  – інтенсивність турбулентності швидкісного напору;

$g$  – піковий фактор (peak factor), який відіграє роль забезпеченості.

В останній редакції Eurocode 1 [11] формула (1) прийнята у якості основного виразу для визначення еквівалентного розрахункового

вітрового навантаження на елементи будівельних конструкцій, при цьому  $g = 3.5$  і прийнято, що  $\varepsilon_w = 2\varepsilon_u$ , де  $\varepsilon_u$  – інтенсивність турбулентності швидкості вітру. У вітчизняних нормах [7] добуток  $g\varepsilon_w$  (або  $2g\varepsilon_u$ ) визначає коефіцієнт пульсацій швидкісного напору  $\zeta$ , регламентований табл. 7 даних норм, а величина  $1 + \zeta$  може служити негласною оцінкою фактору пориву  $G$ . В проекті Державних Будівельних Норм [3] рвучкий характер швидкості вітру враховується введенням коефіцієнту експозиції (коефіцієнту висоти споруди), а методологічні принципи оцінки фактору пориву в цілому наслідують традицію Євронорм [11].

Окреслені підходи дозволяють повністю звести динамічну задачу до статичної і, уникаючи трудомістких обчислювальних процедур, виконати розрахунок конструкції на статичну міцність. Проте залишається відкритим питання про „вітрове зношування” конструкцій, яке не згадується у жодному із закордонних стандартів [8-16] і вітчизняних СНіП [7] та ДБН [3]. Хоча при постановці питань надійності та довговічності конструкцій бажано мати статистичну оцінку кількості циклів їхнього навантаження під впливом поривів вітру (див. рис. 1). Це, насамперед, стосується ресурсу роботи конструктивних, зокрема, болтових і зварених,

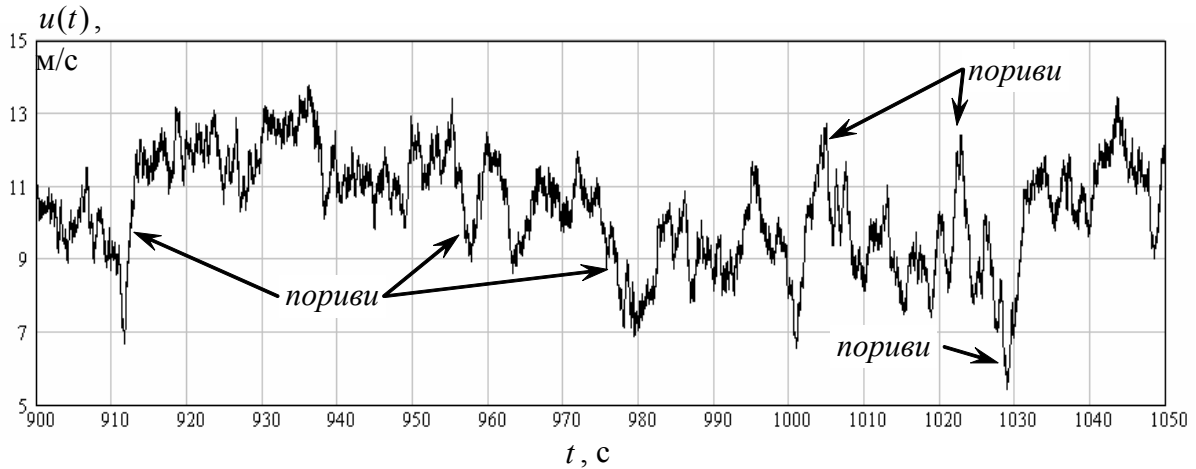


Рис. 1. Характерний вигляд реалізації швидкості вітру з поривами.

з'єднань, найбільш часто застосовуваних у конструкціях. Очевидно, що для одержання зазначеної кількісної оцінки необхідно мати статистичні характеристики вітрового потоку, що описують його рвучкий нестационарний характер (амплітуд, тривалості, максимумів).

#### Аналіз результатів попереднього дослідження

Методика прямої статистичної оцінки локальних характеристик поривів вітру відсутня у нормативних документах, що торкаються цього питання. Тому однією з піонерних розробок даного напрямку можна назвати диференційовану методику авторів робіт [1, 2, 4], які на основі експериментальних досліджень турбулентних пульсацій вітру запропонували наступний алгоритм з оцінки статистичних характеристик поривів вітру, проілюстрований рис. 2.

У якості критерію того, що пульсація швидкості вітру являється поривом, прийнято значення швидкості, що перевищує середнє за ансамблем значень, зареєстрованих на протязі часу спостереження  $\Delta t$ , тобто  $u(t) \geq \bar{u}_{\Delta t}$ . Далі із вихідної реалізації  $\tilde{u}(t)$  формується допоміжна реалізація  $\tilde{W}(t)$ , відфільтрована цифровим фільтром нижніх частот. Метою даної процедури є відсіювання високочастотних пульсацій малої амплітуди і тривалості. Потім на основі відфільтрованої реалізації  $\tilde{W}(t)$  формується друга допоміжна реалізація  $\tilde{D}(t)$  у вигляді імпульсної функції:

$$D(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } u(t) \geq \bar{u}_{\Delta t} \\ 0 & \text{якщо } u(t) < \bar{u}_{\Delta t} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $\bar{u}_{\Delta t}$  – рівень математичного сподівання випадкового процесу пульсацій вітру в рамках обраного періоду осереднення швидкості вітру.

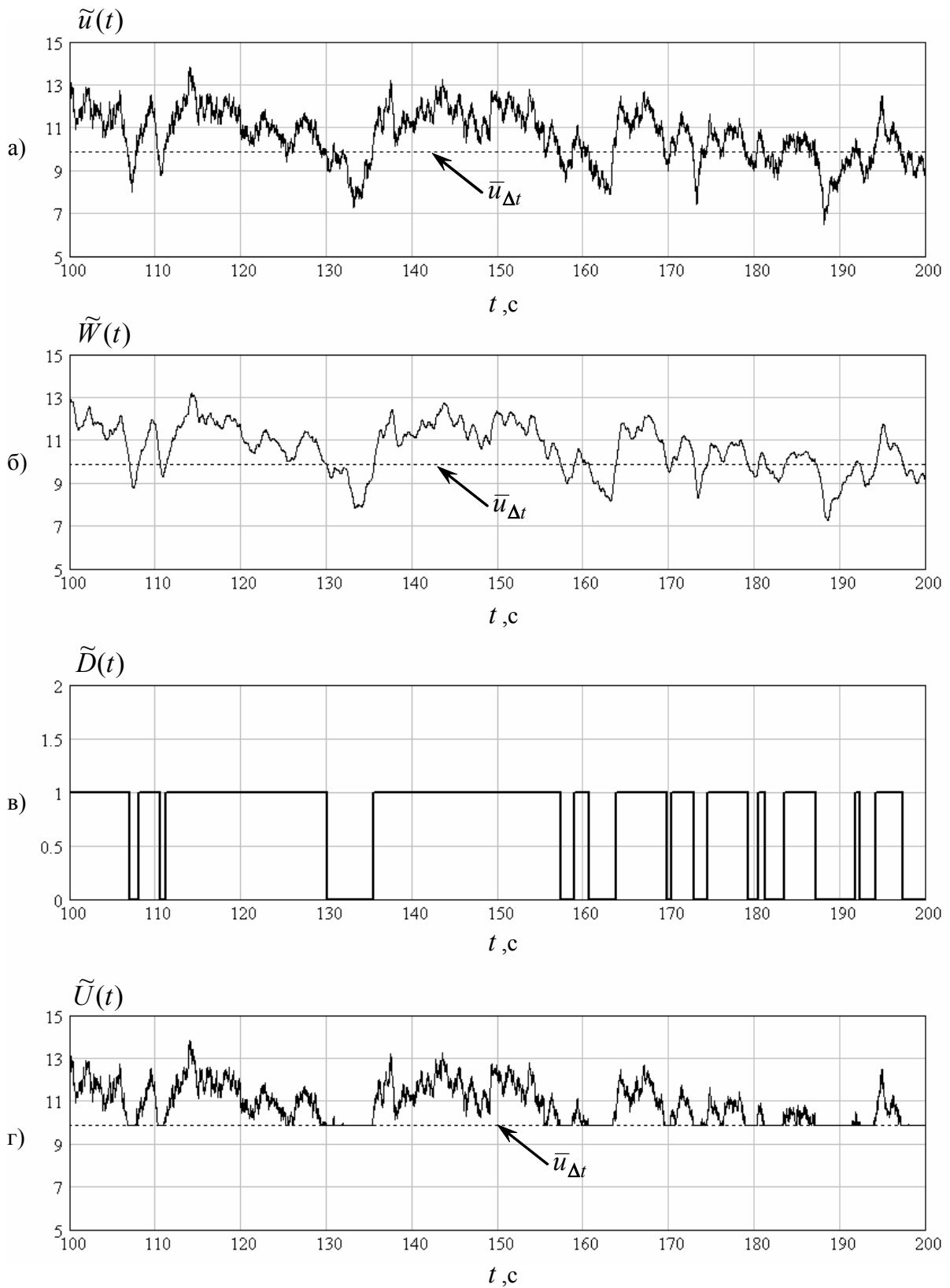
Тривалість пориву визначається за формулою:

$$\tau = f_B^{-1} \sum_i D_i(t), \quad (3)$$

де  $f_B$  – частота вибірки вихідного сигналу.

Максимальне значення швидкості вітру у пориві визначається на основі реалізацій  $\tilde{u}(t)$  і  $\tilde{D}(t)$ . При цьому із реалізації швидкості вітру  $\tilde{u}(t)$  при  $D(t) = 1$  виконується вирізання фрагменту, що містить порив  $\tilde{U}(t)$  та із ансамблю значень цього фрагменту визначається максимальне. Кількість поривів  $n$  у реалізації сигналу швидкості вітру відповідає кількості максимумів.

Описаний алгоритм дозволяє досить зручно, швидко і просто виконувати статистичну оцінку локальних характеристик поривів турбулентного потоку, але йому притаманний ряд методологічних помилок. По-перше, даний підхід не враховує широкосмуговість турбулентних пульсацій швидкості вітру, що у багатьох випадках призводить до недооцінки кількості поривів. Наприклад, процес  $\tilde{u}(t)$  може один раз перетнути рівень математичного сподівання  $\bar{u}_{\Delta t}$  і стохастично змінюватись вище нього,



**Рис. 2.** Алгоритм вирізання поривів вітру із вихідної реалізації швидкості вітру [1, 2, 4]:  
 а) вихідний сигнал; б) відфільтрований сигнал;  
 в) допоміжний сигнал; г) вирізані пориви.

створюючи при цьому різкі піки різної амплітуди, які також можуть вважатись поривами вітру. Але згідно з даною методикою, незалежно від поведінки процесу  $\tilde{u}(t)$  вище рівня  $\bar{u}_{\Delta t}$ , це буде відповідати лише одному пориву. По-друге, різке збільшення швидкості вітру може відбутися і нижче рівня математичного сподівання. А так як у розрахунках на втомленість і при оцінці кількості циклів завантаження конструкцій враховується не тільки абсолютне значення навантаження, але його амплітуда і розмах, то дана обставина також повинна бути врахована. По-третє, допоміжна реалізація  $\tilde{D}(t)$  містить велику кількість „поривів” дуже малої амплітуди і тривалості (див. рис. 2-в, в околі  $t = 180$  с та  $t = 190$  с), які майже не впливають на динамічну реакцію конструкції.

### Скорегована методика

З метою уникнення цих недоліків, пропонується альтернативна методика оцінки локальних статистичних характеристик поривів турбулентного потоку, серед яких найбільш значимі – амплітуда наростання  $\Delta u_n$  та спадання  $\Delta u_c$  швидкості вітру в пориві, час наростання  $\tau_n$  та спадання  $\tau_c$  швидкості вітру в пориві і максимальне значення швидкості вітру в пориві  $u_{\max}$  (рис. 3). При цьому згідно з рекомендаціями Germanisher Lloid [13] було запропоновано розрізнити додатний порив із характеристиками  $\Delta u_n$ ,  $\tau_n$ ,  $u_{\max}$  та від’ємний порив із характеристиками  $\Delta u_c$ ,  $\tau_c$ ,  $u_{\max}$ .

Алгоритм виділення поривів вітру полягає в наступному. Спочатку із вихідної реалізації швидкості вітру  $\tilde{u}(t)$  формується перша допоміжна реалізація  $\mathbf{W}^{\text{ext}} = \{W_k^{\text{ext}}\}_{k \in 0..n}$ , яка утворена послідовністю екстремумів сигналу  $\tilde{u}(t)$ . Дана операція дозволяє значно скоротити об’єм вихідної вибірки (більше ніж у два рази) та досліджувати в наступному тільки екстремуми сигналу  $\tilde{u}(t)$ , не зважаючи на його поведінку між ними. Далі із послідовності  $\mathbf{W}^{\text{ext}} = \{W_k^{\text{ext}}\}_{k \in 0..n}$  формується друга допоміжна реалізація  $\mathbf{H} = \{H_k\}_{k \in 0..n}$ , відфільтрована цифровим фільтром половинного ділення **Fil\_1**. Суть цього фільтра дуже проста. Нехай є одномірний дискретний сигнал  $\mathbf{h} = \{h_k\}_{k \in 0..n}$ . Кожній парі елементів з індексами  $k$  та  $k+1$ , поставимо у відповідність одне значення

$s_k = (h_k + h_{k+1}) / 2$ . Ці значення сформуєть новий сигнал  $\mathbf{s} = \{s_k\}_{k \in Z}$ , який буде згладженою версією вихідного сигналу  $\mathbf{h}$  (кожній парі елементів сигналу  $\mathbf{s}$  відповідає їх середнє арифметичне). До сигналу  $\mathbf{s}$  можна застосувати аналогічну операцію і також отримати нову згладжену оцінку вихідного сигналу. Виконується дана операція до тих пір, поки не буде досягнутий заданий рівень згладжування  $h_{\text{lim}}$ . Стосовно процесу пульсацій швидкості вітру, такий рівень може обиратися візуально або визначатися на основі емпіричної залежності:

$$h_{\text{lim}} = 100u_{\Delta t}, \quad (4)$$

де  $u_{\Delta t}$  – стандарт пульсацій швидкості вітру за обраний період осереднення.

Формула (4) отримана на основі суб’єктивного аналізу численних реалізацій сигналу швидкості вітру. Обчислені за нею значення  $h_{\text{lim}}$  не є догматичними і можуть бути трохи змінені у більшу чи меншу сторону, але це незначною мірою вплине на кінцевий результат статистичної оцінки поривів вітру. На підставі цього у якості середньої оцінки нами рекомендується визначати величину  $h_{\text{lim}}$  за формулою (4), тим більш, що сама реалізація  $\mathbf{H}$  є допоміжною.

Отримана на основі фільтру половинного ділення **Fil\_1** послідовність  $\mathbf{H} = \{H_k\}_{k \in 0..n}$  є основою для формування другої допоміжної реалізації  $\mathbf{H}^{\text{ext}} = \{H_j^{\text{ext}}\}_{j \in 0..m < n}$ . Дана реалізація формується на основі фільтру екстремального згладжування **Fil\_2** і являє собою профільтовану версію сигналу  $\mathbf{W}^{\text{ext}} = \{W_k^{\text{ext}}\}_{k \in 0..n}$ . Суть цієї фільтрації зводиться до наступного. Спочатку реалізація  $\mathbf{H} = \{H_k\}_{k \in 0..n}$  замінюється послідовністю локальних екстремумів  $\mathbf{H}^{\text{ext,loc}} = \{H_j^{\text{ext,loc}}\}_{j \in 0..m}$ , після чого, відкривши цикл за всіма значеннями  $j$ , виконується пошук найбільшого та найменшого значення серед елементів реалізації  $\mathbf{W}^{\text{ext}} = \{W_k^{\text{ext}}\}_{k \in 0..n}$  на інтервалі часу  $[T_j^{\text{ext}}, T_{j+1}^{\text{ext}}]$ , де  $T_j^{\text{ext}}$  – елемент вектору часу  $T^{\text{ext}}$ , що поставлений у відповідність елементу  $H_j^{\text{ext,loc}}$  реалізації  $\mathbf{H}^{\text{ext,loc}}$ . Відшукані екстремальні значення формують  $j$  та  $j+1$  елемент реалізації  $\mathbf{H}^{\text{ext}}$ .

Після закінчення формування реалізації  $\mathbf{H}^{\text{ext}} = \{H_j^{\text{ext}}\}_{j \in 0..m < n}$  виконується вирізка

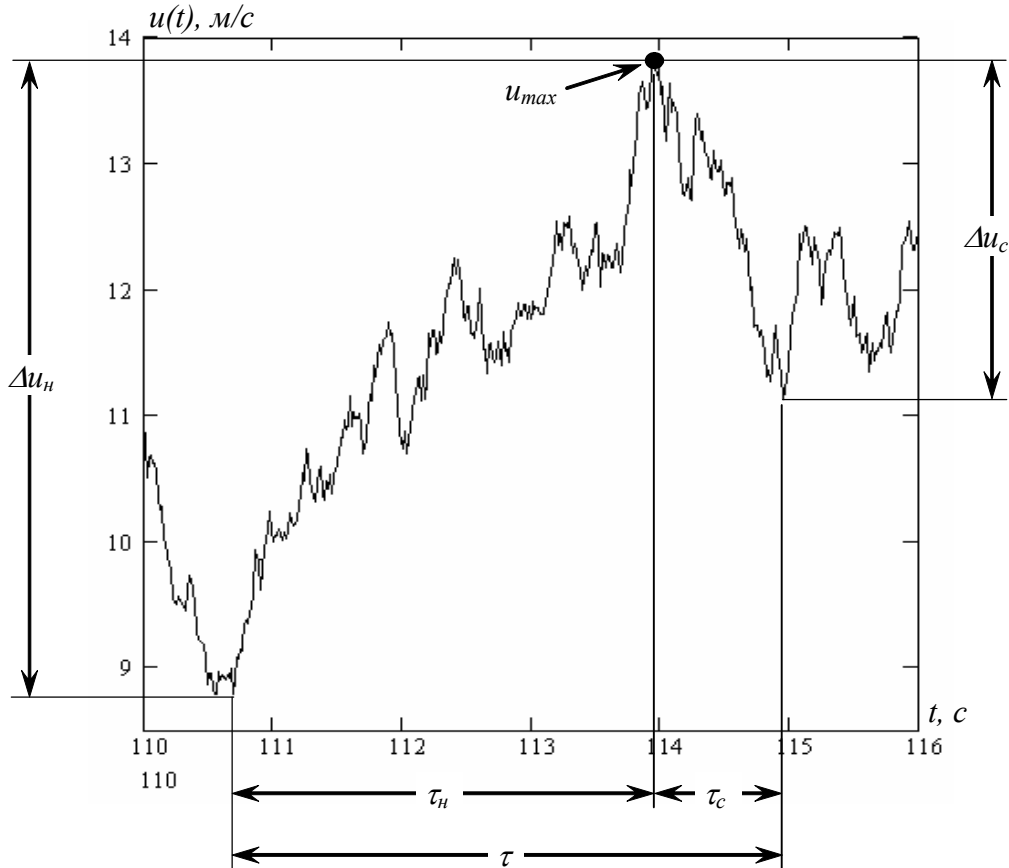


Рис. 3. Основні характеристики поодиноких поривів вітру.

додатних та від'ємних поривів швидкості вітру на основі критерію  $|H_{j+1}^{ext} - H_j^{ext}|_{j \in 0..m} \geq 2u_{\Delta t}$ . Даний критерій є умовним і введений головним чином для того, щоб окреслити потенційно можливі випадки динамічної дії пульсацій вітру на елементи конструкції. В подальшому дана умовність може бути скорегована, виходячи із властивостей конструкції та виду розрахунку (наприклад, відомо, що при оцінці довговічності від втомленості, цикли, амплітуда яких менше мінімального значення межі витривалості матеріалу конструкції в розрахунку не враховуються).

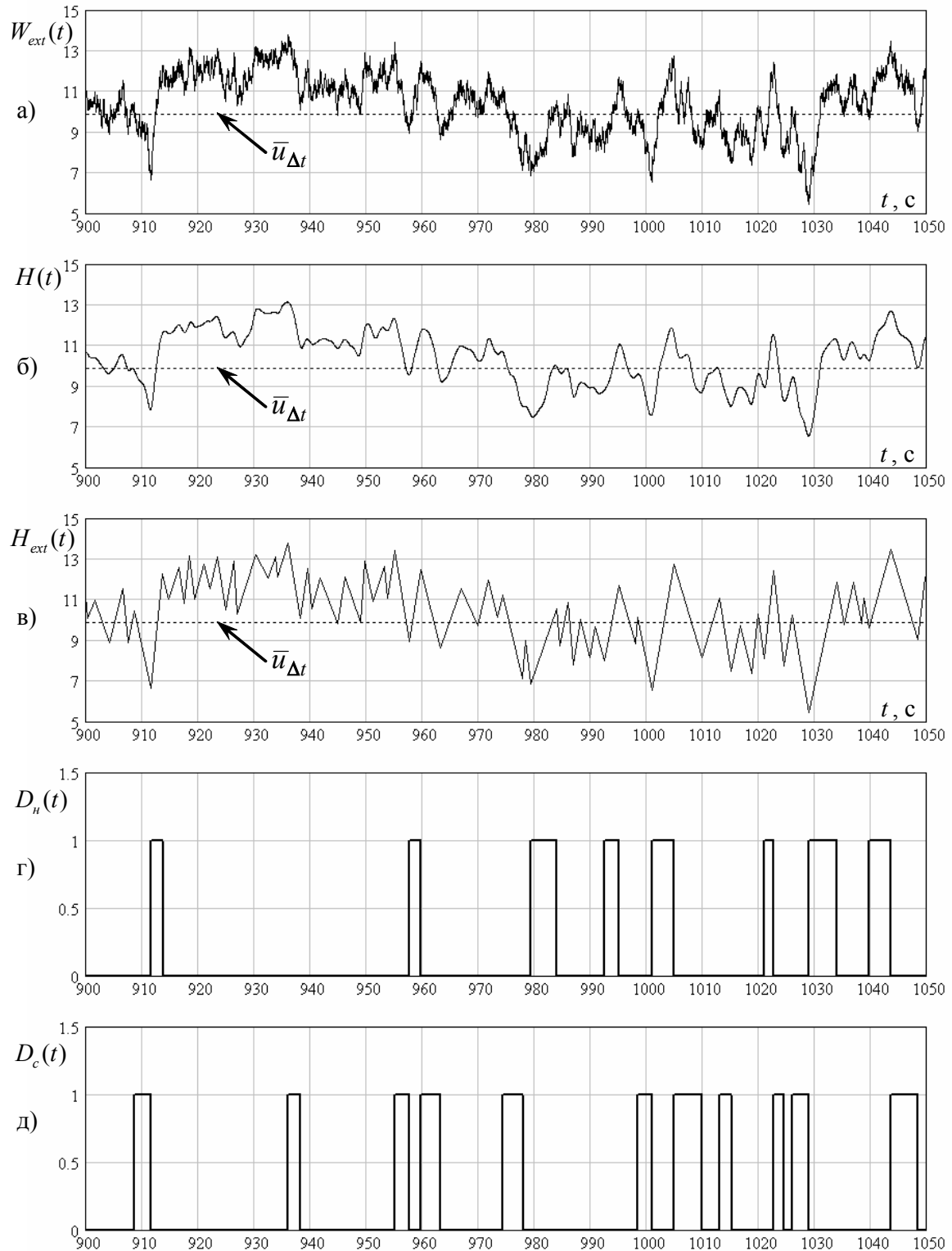
Далі на основі відфільтрованої реалізації  $\mathbf{H}^{ext} = \{H_j^{ext}\}_{j \in 0..m}$  і описаного вище критерію пориву швидкості вітру формуються імпульсні реалізації процесів  $\mathbf{D}^n = \{D_j^n\}_{j \in 0..m}$  і  $\mathbf{D}^c = \{D_j^c\}_{j \in 0..m}$ , що задовольняють умові:

$$D_j^n \cup D_j^c = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |H_{j+1}^{ext} - H_j^{ext}|_{j \in 0..m} = \Delta u_{n,(j)} \cup \Delta u_{c,(j)} \geq 2u_{\Delta t}, \\ 0, & \text{якщо } |H_{j+1}^{ext} - H_j^{ext}|_{j \in 0..m} < 2\bar{u}_{\Delta t}. \end{cases} \quad (5)$$

Ці реалізації служать для візуалізації місця виникнення додатного або від'ємного пориву швидкості вітру, а також можуть бути використані при визначенні тривалості останніх  $\tau_n$  та  $\tau_c$ . Максимальне значення швидкості вітру у пориві визначається на основі значень  $|H_{j+1}^{ext} - H_j^{ext}|_{j \in 0..m} = \Delta u_{n,(j)}$ . Кількість поривів у реалізації сигналу швидкості вітру  $n_c$  відповідає кількості амплітудних значень додатних та від'ємних поривів (відповідно  $\Delta u_n$  і  $\Delta u_c$ ). Алгоритм вирізання поривів проілюстрований рис. 4.

#### Практична реалізація запропонованого алгоритму

Для апробації запропонованого алгоритму авторами була виконана статистична оцінка реалізацій швидкостей вітру, зареєстрованих у



**Рис. 4.** Алгоритм вирізання поривів швидкості вітру:

**а)** процес  $W_{ext}(t)$  – процес, який утворений послідовністю екстремумів вихідної реалізації швидкості вітру  $u(t)$ ;  
**б)** процес  $H(t)$  – процес, який утворений фільтром половинного ділення

**Філ 1;** **в)** процес  $H_{ext}(t)$  – процес, який утворений фільтром екстремального згладжування

**Філ 2;** **г), д)** відповідно допоміжна реалізація висхідних  $D_u(t)$  та нисхідних  $D_c(t)$  поривів.

двох принципово відмінних мікрометеорологічних умовах: на полігоні з випробування електросітьових та баштових споруд ДонНАБА і на робочому майданчику Новоазовської вітроелектростанції. Збір даних про швидкість вітру виконувався за допомогою термоанемометру постійної температури, підключеного до універсальної системи моніторингу конструкцій УСМК-1 (розробка ДонНАБА) [1, 2, 4]. Реєстрація сигналу, адекватного швидкості вітру здійснювалася в діапазоні частот пульсацій  $[0.001 \div 30]$  Гц при частоті вибірки сигналу 64 та 72 Гц. Нижня границя частотного діапазону визначена тривалістю кожної із зареєстрованих реалізацій сигналів швидкості вітру. Вона обрана такою, дорівнює одній годині для 30 зафіксованих реалізацій.

В табл. 1 наведені статистичні характеристики поривів для годинних реалізацій швидкісних сигналів, при цьому прийнято:  $n_G$  – кількість поривів у реалізації;  $\Delta \bar{u}_n$ ,  $\Delta \bar{u}_c$  та  $\Delta u_n$ ,  $\Delta u_c$  – відповідно математичні сподівання та стандарти амплітуд додатних і від’ємних поривів швидкості вітру;  $\bar{\tau}_n$ ,  $\bar{\tau}_c$  та  $\tau_n$ ,  $\tau_c$  – відповідно математичні сподівання і стандарти тривалості додатних та від’ємних поривів;  $\bar{u}_{\max}$  – середнє максимальне значення швидкості вітру в пориві. За даними таблиці прослідковується невелика мінливість статистичних характеристик поривів окремих реалізацій швидкості вітру, однак кількість поривів може різнитися доволі суттєво. Очевидно, це є проявом нестаціонарності вітрового потоку. Крім того, звертає на себе увагу і той факт, що відповідні статистичні характеристики додатних та від’ємних поривів окремих реалізацій приблизно однакові. Підтвердженням цього можуть служити також гістограми, зображені на рис. 5-а-г. При цьому для гістограм амплітуд поривів та максимумів швидкості вітру в пориві на зазначених рисунках виконаний перехід до безрозмірного вигляду (більш зручного для екстраполяції отриманих результатів на інші вітрові режими місцевості): для амплітуд поривів швидкості вітру (рис. 5-а, б) використовується величина  $u_{ref} = (\Delta u_n \cup \Delta u_c - 2u_{\Delta t}) / u_{\Delta t}$ ; для максимумів швидкості вітру в пориві (рис. 5-д) – величина  $\gamma_m = (u_{\max} - \bar{u}_{\Delta t}) / u_{\Delta t}$ . Аналіз можливих апроксимуючих виразів дослідних даних показав доцільність застосування щільностей роз-

поділу трьох типів: 1) для амплітуд поривів залучається експоненціальний розподіл (6); 2) для тривалості поривів – розподіл Вейбулла (7) із параметрами  $\alpha_\tau = 1.2$ ;  $\beta_\tau = 1.4$ ; 3) для максимумів швидкості вітру в пориві – подвійний експоненціальний розподіл Гумбеля (8) із параметрами  $\alpha_m = 1.25$ ,  $u_m = 1.45$ :

$$f_a(u_{ref}) = \exp[-u_{ref}], \quad (6)$$

$$f_\tau(\tau) = \frac{\beta_\tau}{\alpha_\tau} \tau^{\beta_\tau-1} \exp\left[-\frac{\tau^{\beta_\tau}}{\alpha_\tau}\right], \quad (7)$$

$$f_{\max}(\gamma_m) = \alpha_m \exp[\alpha_m(u_m - \gamma_m)] \times \exp\{-\exp[\alpha_m(u_m - \gamma_m)]\} \quad (8)$$

Отримані вирази дозволяють стосовно локальних умов вітрового режиму місцевості на основі значень середньої швидкості вітру  $\bar{u}_{\Delta t}$  та стандарту пульсацій  $u_{\Delta t}$  швидкості вітру, отриманих або шляхом прямого вимірювання, або методом інтерполяції даних метеостанцій, визначити розрахункові значення величин  $\Delta u_n$ ,  $\Delta u_c$ ,  $\tau_n$ ,  $\tau_c$ ,  $u_{\max}$ . Слід також особливо підкреслити, що між випадковими величинами  $\Delta \tilde{u}_n$  (відповідно і  $\Delta \tilde{u}_c$ ),  $\tilde{\tau}_n$  (відповідно і  $\tilde{\tau}_c$ ) та  $\tilde{u}_{\max}$  не виявлений кореляційний зв'язок (коефіцієнти кореляції складають  $\rho(\Delta \tilde{u}_n \cup \Delta \tilde{u}_c; \tilde{u}_{\max}) = 0.013$ ,  $\rho(\Delta \tilde{u}_n \cup \Delta \tilde{u}_c; \tilde{\tau}_n) = 0.132$ ,  $\rho(\tilde{u}_{\max}; \tilde{\tau}_n) = 0.063$ ), що дає підстави вважати ці величини також і незалежними. Останнє дозволяє представити сумісну щільність розподілу амплітуд, тривалості і максимумів поривів у вигляді:

$$\begin{aligned} f_{a,\tau,\max}(\Delta u_n \cup \Delta u_c; \tau_n \cup \tau_c; u_{\max}) &= \\ &= \frac{1}{u_{\Delta t}^2} f_a\left[\frac{\Delta u_n \cup \Delta u_c - h_{lim}}{u_{\Delta t}}\right] \times \\ &\times f_\tau[\tau_n \cup \tau_c] f_{\max}\left[\frac{u_{\max} - \bar{u}_{\Delta t}}{u_{\Delta t}}\right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Формула (9) є найбільш повною характеристикою імовірнісної природи поривів вітру і дозволяє вирішувати задачі надійності у більш адекватній постановці.

Представляється цікавим зупинитись ще на одному аспекті окресленої вище проблеми. До цього часу пір у вітчизняних та зарубіжних джерелах по **wind engineering** залишається

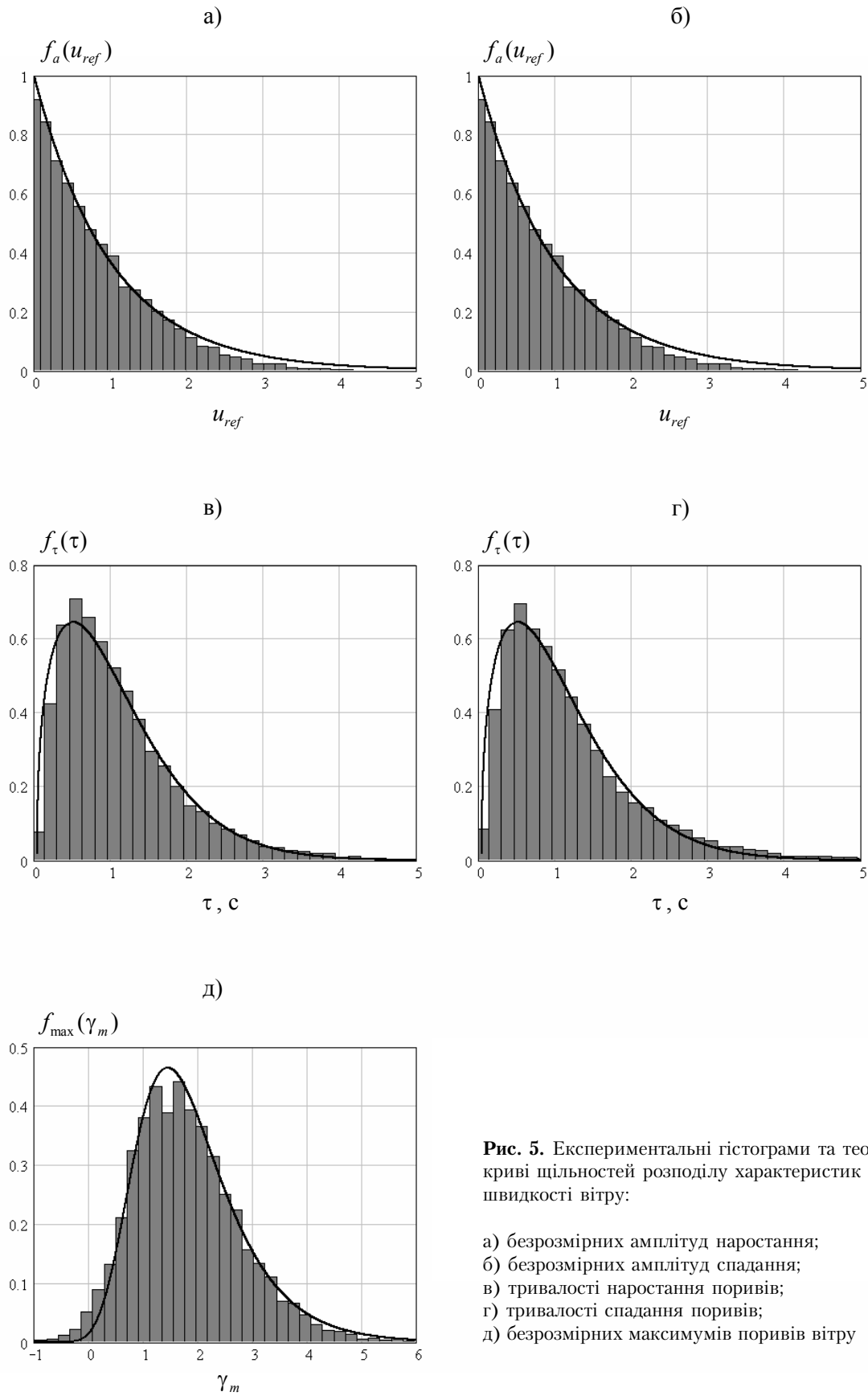


Таблиця 1. Результати статистичної обробки інформації про пориви вітру.

№ n/n	$n_G$	Додатний порив				Від'ємний порив				$\bar{u}_{\max}$
		$\Delta\bar{u}_H$	$\Delta u_H$	$\bar{\tau}_H$	$\tau_H$	$\Delta\bar{u}_c$	$\Delta u_c$	$\bar{\tau}_c$	$\tau_c$	
1	4707	8.575	1.883	0.759	0.453	8.603	1.844	0.743	0.469	13.244
2	1533	4.867	0.851	1.080	0.569	4.758	0.818	1.083	0.577	11.697
3	169	4.225	0.952	2.096	0.758	4.345	1.205	2.015	0.764	13.723
4	1997	4.809	0.997	1.034	0.510	4.828	0.973	1.102	0.542	13.092
5	313	4.215	0.805	1.788	0.639	4.095	0.601	1.947	0.776	13.563
6	238	3.946	0.707	2.017	0.596	3.766	0.511	1.801	0.541	11.693
7	288	4.085	0.517	1.557	0.566	4.037	0.483	1.431	0.584	8.181
8	3132	3.658	0.831	0.780	0.385	3.700	0.854	0.808	0.397	7.105
9	85	4.621	1.980	2.113	0.694	4.564	1.797	2.086	0.651	12.743
10	1802	4.469	0.884	0.988	0.463	4.478	0.959	0.965	0.464	10.963
11	769	1.546	0.624	1.159	0.733	1.505	0.616	1.275	0.747	2.094
12	1039	1.929	0.595	1.225	0.746	1.912	0.594	1.313	0.805	2.252
13	798	4.333	1.199	1.205	0.818	4.230	0.964	1.301	0.916	5.592
14	457	2.583	0.586	1.554	0.795	2.520	0.564	1.768	1.034	3.379
15	600	2.044	0.541	1.389	0.794	2.003	0.453	1.450	0.874	2.662
16	715	2.342	0.632	1.231	0.718	2.304	0.607	1.268	0.760	3.057
17	606	2.330	0.673	1.232	0.717	2.241	0.603	1.249	0.671	3.009
18	571	3.591	0.867	1.805	1.001	3.553	0.843	1.915	1.334	4.845
19	617	3.754	0.979	1.860	1.179	3.699	0.976	1.961	1.232	5.089
20	657	3.592	1.004	1.699	1.021	3.466	0.955	1.922	1.177	5.006
21	186	1.176	0.259	1.524	0.906	1.154	0.246	1.447	0.859	1.460
22	1032	1.764	0.481	1.251	0.764	1.727	0.466	1.258	0.750	2.122
23	558	2.955	0.838	1.736	1.079	2.985	0.892	1.832	1.235	4.134
24	615	3.675	0.975	1.801	1.089	3.650	0.984	1.902	1.109	5.004
25	685	3.015	0.684	1.357	0.782	2.925	0.645	1.340	0.819	4.265
26	546	3.586	0.880	1.608	0.931	3.459	0.811	1.627	1.007	4.755
27	742	5.744	1.759	1.945	1.314	5.635	1.652	2.272	1.398	6.876
28	777	5.172	1.465	1.492	0.895	5.063	1.312	1.762	1.155	6.457
29	687	5.496	1.757	1.561	0.926	5.566	1.696	1.757	1.042	7.152
30	648	4.411	1.332	1.656	1.164	4.319	1.262	1.764	1.168	5.502

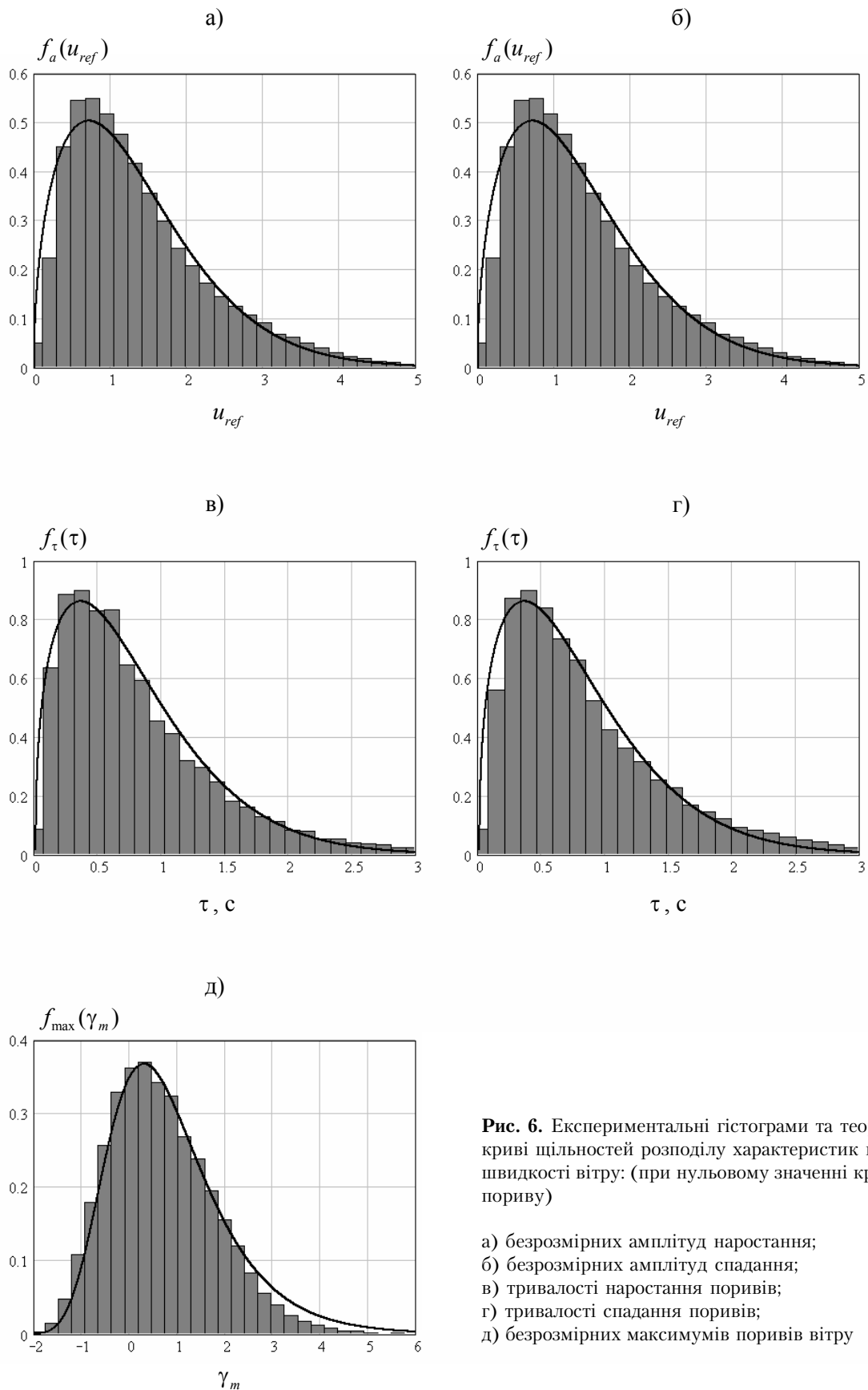
невизначеним сам термін „порив вітру”. В одних випадках порив ототожнюють із звичайними пульсаціями швидкості вітру, в інших (наприклад, рекомендації Germanisher Lloid [13]) – робиться акцент на тому, що не всяка пульсація може вважатися поривом, а під останнім слід розуміти різке короточасне зростання або спадання швидкості вітру великої амплітуди. Проте яке саме значення амплітуди повинно фігурувати під час статистичної обробки експериментальних даних залишається незрозумілим. З одного боку, точно відповісти на це питання можна на основі аналізу динамічних характеристик конкретної конструкції, до числа

яких відносяться період власних коливань та коефіцієнт демпфірування. З іншого боку, треба пам'ятати, що у методологію норм проектування покладене роздільне описання навантажень та властивостей конструкцій. Зважаючи на це, граничне значення амплітуди пульсацій вітру, вище за яку її можна вважати поривом, є на сьогодні дискусійним питанням. В даній роботі, при в першому наближенні таким значенням виступає величина  $2u_{\Delta}$ , хоча в майбутньому, при більш масштабному вивченні цього питання, це значення може бути змінено у напрямку збільшення чи зменшення. У якості однієї з можливих альтернатив можна запропонувати



**Рис. 5.** Експериментальні гістограми та теоретичні криві щільностей розподілу характеристик поривів швидкості вітру:

- а) безрозмірних амплітуд наростання;
- б) безрозмірних амплітуд спадання;
- в) тривалості наростання поривів;
- г) тривалості спадання поривів;
- д) безрозмірних максимумів поривів вітру



**Рис. 6.** Експериментальні гістограми та теоретичні криві щільностей розподілу характеристик поривів швидкостей вітру: (при нульовому значенні критерію пориву)

- а) безрозмірних амплітуд наростання;
- б) безрозмірних амплітуд спадання;
- в) тривалості наростання поривів;
- г) тривалості спадання поривів;
- д) безрозмірних максимумів поривів вітру

взагалі виконувати оцінку статистичних характеристик поривів вітру на основі реалізації  $\mathbf{H}^{\text{ext}}$  (див. рис. 4-в), а граничне значення критерію пориву прийняти рівним нулю. Сказане у повній мірі ілюструє рис. 6, на якому статистична оцінка величин  $\Delta u_n$ ,  $\Delta u_c$ ,  $\tau_n$ ,  $\tau_c$ ,  $u_{\text{max}}$  виконана аналогічно рис. 5. В цьому випадку для амплітуд поривів залучається розподіл Вейбулла (10) із параметрами  $\alpha_a = 1.8$ ,  $\beta_a = 1.5$ ; для тривалості поривів – розподіл Вейбулла (11) із параметрами  $\alpha_\tau = 0.8$ ;  $\beta_\tau = 1.4$ ; для максимумів швидкості вітру в пориві – подвійний експоненціальний розподіл Гумбеля (12) із  $\alpha_m = 1.0$ ,  $u_m = 0.3$ :

$$f_a(u_{\text{ref}}) = \frac{\beta_a}{\alpha_a} u_{\text{ref}}^{\beta_a-1} \exp\left[-\frac{u_{\text{ref}}^{\beta_a}}{\alpha_a}\right], \quad (10)$$

$$f_\tau(\tau) = \frac{\beta_\tau}{\alpha_\tau} \tau^{\beta_\tau-1} \exp\left[-\frac{\tau^{\beta_\tau}}{\alpha_\tau}\right], \quad (11)$$

$$f_{\text{max}}(\gamma_m) = \alpha_m \exp[\alpha_m(u_m - \gamma_m)] \times \exp\{-\exp[\alpha_m(u_m - \gamma_m)]\}. \quad (12)$$

## Висновки

1. Розроблений алгоритм, який дозволяє виконувати статистичну оцінку параметрів рвучкого повітряного потоку: амплітуд і тривалості поривів вітру, максимумів швидкості вітру в пориві.
2. За розробленою методикою виконана обробка експериментальних даних, в результаті якої висунуті наступні висновки: 1) статистичні характеристики амплітуди і тривалості додатних і від'ємних поривів повністю співпадають; 2) щільність розподілу амплітуд поривів може бути виражена формулою (6) або (10); 3) для щільності розподілу тривалості поривів можна застосовувати вираз (7) або (11); 4) щільність розподілу максимумів швидкості вітру в пориві відбувається за законами (8) або (12).
3. Алгоритм може залучатись не тільки до поривів вітру, але і по відношенню до подібних викидів у інших процесах. Наприклад, до

оцінки кількості циклів перерозподілу напружень та їх амплітуд у припорній зоні башт вітроенергетичних установок.

## Література

1. Горохов Е.В., Некрасов Ю.П., Югов А.М. Оценка количества циклов загрузки эксплуатируемых металлических конструкций // Вісник ДонДАБА "Будівельні конструкції, будівлі та споруди". – Вип. 2 (44). – Макіївка, 2004. – С. 56-62.
2. Горохов Е.В., Некрасов Ю.П., Югов А.М. Исследование локальных статистических характеристик приземного ветра // Вісник ДонДАБА. – Вип. 2001- 4(29). – Макіївка. – 2001. – С. 4-8.
3. ДБН В.1.2...-2003. Система надежности и безопасности в строительстве. Нагрузки и воздействия (проект).
4. Некрасов Ю.П. Динамические воздействия ветра на металлические решётчатые башни ветроэнергетических установок: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.23.01 / Макеевка. – 2002. – 19 с.
5. Пичугин С.Ф., Махінько А.В. Ветровая нагрузка на строительные конструкции. – Полтава, 2005. – 342 с.
6. Пичугин С.Ф., Махінько А.В. До оцінки очікуваного ресурсу елементів металоконструкцій при вібраційній дії турбулентного вітру // Зб. наук. пр. ПНТУ імені Юрія Кондратюка: Галузеве машинобудування, будівництво. – Вип. 16. – Полтава: ПНТУ. – 2005. – С. 240-249.
7. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 36 с.
8. Davenport A.G. The Relationship of Wind Structure to Wind Loading. Proceeding of the Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures, Teddington, vol. 1, 1963. – P. 54-102.
9. Davenport A.G. The Response of Slender Line-like Structures to a Gusty Wind. Proc Inst Civil Engineers 1962, №23. – P. 369-408.
10. Davenport A.G. Gust Loading Factors // Journal of Structural Division, ASCE. – Vol. 93. – No. ST3. – 1967. – P. 11-34.
11. Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-4: General actions – Wind Actions. – Brussels: CEN, 2002. – 155 p.
12. ESDU 85020. Characteristic of Atmospheric Turbulence Near the Ground. Part II: Single Point Data for Strong Winds (Neutral Atmosphere), Engineering Science Data Unit, London, 1993.
13. Germanisher Lloid. Rules and Regulations. IV – Non Marine Technology. Part 1-Wind Energy. Regulation for the Certification of Wind Energy Conversion Systems. Chapter 1-10. Supplement №1 to the 1993 Edition. – 1994.

14. ISO 6897: 1984. Guidelines for the Evaluation of the Response of Occupants of Fixed Structures, Especially Buildings and off-shore Structures, to Low-frequency Horizontal Motion (0.063 to 1 Hz), – International Organization of Standardizing, Geneva.
15. Minimum Design Loads for Buildings and other Structures // American Society of Civil Engineers. ANSI / ASCE 7-95. – New York (USA). – 1998. – P. 12-34, 148-169.
16. National Building Code of Canada. NRC-CNRC. Live Loads due to Wind Canadian Commission on Building and Fire Codes. National Research Council. – Canada. – 1995.
17. Simiu E. Toward a New Generation of Standards for Wind Loads: Implications for Design Practice, Insurance, and Research // The Eight U.S. National Conf. on Wind Engineering. – Baltimore (USA). – 1997. – CD.
18. Solari G., Pagnini L.C. Gust Buffeting and Aeroelastic Behavior of Poles and Monotubular Towers // Journal of Fluids and Structures. – No. 13. – 1999. – P. 877-905.

**Некрасов Юрій Петрович** працює доцентом кафедри "Екологія і безпека життєдіяльності" Донбаської національної академії будівництва та архітектури. Наукові інтереси: вітрові впливи на будівельні конструкції, імовірнісна природа вітрових впливів, експериментальні дослідження вітрових течій.

**Махінко Антон Володимирович** вчиться в аспірантурі Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: методи оцінки проектної й експлуатаційної надійності будівельних конструкцій. Опис випадкових навантажень у різній імовірнісній техніці. Розв'язання задач сполучення навантажень. Математичні методи опису відмов будівельних конструкцій.

**Некрасов Юрій Петрович** работает доцентом кафедры "Экология и безопасность жизнедеятельности" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: ветровые воздействия на строительные конструкции, вероятностная природа ветровых воздействий, экспериментальные исследования ветровых течений.

**Махінко Антон Владимирович** учится в аспирантуре Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Научные интересы: методы оценки проектной и эксплуатационной надёжности строительных конструкций. Описание случайных нагрузок в различной вероятностной технике. Решение задач сочетания нагрузок. Математические методы описания отказов строительных конструкций.

**Nekrasov Yuriy Petrovych** is a Docent of Ecology and Safety of Vital Activity department at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: wind actions on structures, random nature of wind influences, experimental investigations of wind flows.

**Makhinko Anton Volodymyrovych** is a Post-graduate Student of Metal and Wooden Structures department at Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. His research interests include the methods of the design reliability estimation and serviceability estimation of building structures. The description of the stochastic loads in different probabilistic technology. The decision of the loads combination problems. Mathematical descriptions of the building structures failure.