



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

2013, ТОМ 19, НОМЕР 2, 111–120

УДК 624.042.41

(13)-0288-1

## ДО ПИТАННЯ ФОРМУЛЮВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ ВІТРОВОГО ВПЛИВУ НА ВИСОТНІ СПОРУДИ

**С. Ф. Пічугін <sup>a</sup>, А. В. Махінко <sup>b</sup>**

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

<sup>b</sup> Будівельна компанія «ЕТУАЛЬ»,  
вул. Бортницька, 1, с. Петровське, Бориспільський р-н., Київська обл., Україна, 08341.

E-mail: pasargada@mail.ru

Отримана 14 березня 2013; прийнята 26 квітня 2013.

**Анотація.** У статті сформульована одна з можливих узагальнених моделей вітрового впливу на висотні споруди. В основу запропонованої моделі покладена схематизація пульсацій вітрового потоку у вигляді двох некорельованих випадкових процесів: поздовжньої і поперечної швидкості вітру. Відмічається, що врахування поперечної компоненти турбулентності вітру для висотних будівель та споруд з чітко вираженою аеродинамічною асиметрією приводить до суттєвого підсилення їх реакцій поперек потоку. При побудові моделі використовується багаторічний досвід динамічного розрахунку висотних споруд у різній ймовірнісній техніці. Матеріал викладається безвідносно до розрахункових схем будівель та споруд і виду їх завантаження випадковими вітровими впливами. В практичних розрахунках пропонується оперувати простими математичними моделями із безрозмірними параметрами.

**Ключові слова:** атмосферна турбулентність, пульсаційна швидкість вітру, випадковий процес, висотні споруди, аеродинамічна асиметрія.

## К ВОПРОСУ ФОРМУЛИРОВАНИЯ ОБОБЩЁННОЙ МОДЕЛИ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫСОТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

**С. Ф. Пичугин <sup>a</sup>, А. В. Махинько <sup>b</sup>**

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

<sup>b</sup> Строительная компания «ЕТУАЛЬ»,  
ул. Бортницкая, 1, с. Петровское, Бориспольский р-н., Киевская обл., Украина, 08341.

E-mail: pasargada@mail.ru

Получена 14 марта 2013; принята 26 апреля 2013.

**Аннотация.** В статье сформулирована одна из возможных обобщённых моделей ветрового воздействия на высотные сооружения. В основу предложенной модели положена схематизация пульсаций ветрового потока в виде двух некоррелированных случайных процессов: продольной и поперечной скорости ветра. Показывается, что учёт поперечной компоненты турбулентности ветра для высотных зданий и сооружений с ярко выраженной аэродинамической асимметрией приводит к существенному усилению их реакций поперёк потока. При построении модели используется многолетний опыт динамического расчёта высотных сооружений в различной вероятностной технике. Материал излагается безотносительно к расчётным схемам зданий и сооружений и вида их загрузки случайными

ветровими воздействиями. В практических расчётах предлагается оперировать простыми математическими моделями с безразмерными параметрами.

**Ключевые слова:** атмосферная турбулентность, пульсационная скорость ветра, случайный процесс, высотные сооружения, аэродинамическая асимметрия.

## TO FORMULATION OF GENERALISED WIND-EXCITED MODEL ON TALL SLENDER STRUCTURES

Sergey Pichugin <sup>a</sup>, Anton Makhinko <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Poltava National Technical Yu.Kondratyuk University,  
24, Pervomaisky Ave, Poltava, Ukraine, 36011.

<sup>b</sup> Building Company «ETUAL»,  
1, Bortnitskay Ave, Petrovskoe, Boryspil District, Kyiv region, Ukraine, 08341.  
E-mail: pasargada@mail.ru

Received 14 March 2013; accepted 26 April 2013.

**Abstract.** In this paper one of possible generalised wind-excited model on tall slender structures is formulated. Base of model is schematization of atmospheric turbulence as two uncorrelated stochastic process: alongwind and lateral wind turbulence components. It is shown that account of lateral turbulence component for tall slender structures with aerodynamic asymmetry form leads to an essential increase of their crosswind response. The model is formulated on the basis of long-term experiences of dynamic design of slender tall buildings in the various probabilistic technic. The material is stated regardless to design schemes of building structures and stochastic wind loads. In practical calculations it is offered to operate with simple mathematical models with dimensionless parameters.

**Keywords:** atmospheric turbulence, wind turbulence, stochastic process, tall buildings, aerodynamic asymmetry.

### Вступ

У загальному випадку вплив вітру на висотні споруди проявляється у вигляді трьох складових: сили лобового опору  $\tilde{F}_x(z, \theta, t)$ , підйомної (бічної) сили  $\tilde{F}_y(z, \theta, t)$  та аеродинамічного моменту  $\tilde{M}_z(z, \theta, t)$ :

$$\tilde{F}_x(z, \theta, t) = \tilde{w}_z(z, t) \cdot A(z) \cdot C_D(z, \theta), \quad (1)$$

$$\tilde{F}_y(z, \theta, t) = \tilde{w}_z(z, t) \cdot A(z) \cdot C_L(z, \theta), \quad (2)$$

$$\tilde{M}_z(z, \theta, t) = \tilde{w}_z(z, t) \cdot A(z) \cdot b(z) \cdot C_M(z, \theta), \quad (3)$$

де  $A(z)$  і  $b(z)$  – навітряна площа споруди та її ширина на рівні  $z$ ;

$C_D(z, \theta)$ ,  $C_L(z, \theta)$ ,  $C_M(z, \theta)$  – коефіцієнт лобового опору, підйомної сили та аеродинамічного моменту на рівні  $z$  при куті атаки вітрового потоку  $\theta$ ;

$\tilde{w}_z(z, t)$  – випадковий процес середнього швидкісного напору на рівні  $z$ .

В галузі вітрових впливів на висотні споруди сукупність трьох складових вітрового наванта-

ження вивчається доволі рідко [1–9], що обумовлюється складністю математичного опису такої комбінованої дії. У більшості випадків намагаються обмежитись розглядом тільки сили лобового опору, нехтуючи силовими ефектами, пов'язаними із підйомною силою та аеродинамічним моментом. При цьому дана тенденція характерна не тільки для окремих наукових розробок і пропозицій [10–25], але майже для всіх світових норм у цій галузі [26–37]. Не можна сказати, що подібний підхід є невірним, тому що дійсно існує цілий клас споруд, для яких врахування сили  $\tilde{F}_y(t)$  та моменту  $\tilde{M}_z(t)$  не суттєво впливає на остаточну оцінку їх реакції, але не можна забувати й про чималу кількість споруд, які не відносяться до цього класу.

Зручно розмежовувати наступні випадки появи бічної сили та аеродинамічного моменту, які можуть зустрічатися як окремо, так й в поєднанні один з одним:

- тіло, яке можна вважати жорстким та жорстко опертим, не має площини симетрії (рис. 1а);

- тіло, яке можна вважати жорстким і жорстко опертим, має площину симетрії, але повітряний потік не є паралельним цій площині (рис. 1б);
- повітряний потік має чітко виражений турбулентний характер. Оскільки турбулентні пульсації потоку випадкові, у будь-який момент часу він є асиметричним, зокрема відносно площини, яка паралельна напрямку його поширення;
- якщо тіло має погано обтічну форму, потік не слідує його контуру, а зривається. Внаслідок цього у супровідному струмені, який утворюється позаду тіла, пульсації потоку проявляють різний ступінь періодичності, починаючи від гармонічних коливань із однією частотою до розвиненої турбулентності (рис. 2);
- тіло виконує пружні динамічні переміщення, які у кожний момент часу викликають зміни

граничних умов потоку. Із цими змінами пов'язана асиметричність течії і, відповідно, поява навантажень поперек потоку. Ці сили проявляються в результаті пружних переміщень тіла і мають назву самозбудних. Такий процес взаємодії при певних умовах може бути розбіжним, і тоді прийнято говорити про виникнення аеропружної нестійкості.

Всі розглянуті нижче явища, які характеризують коливання висотних споруд поперек повітряного потоку, ми пов'язуватимемо із першими чотирма випадками асиметричності течії.

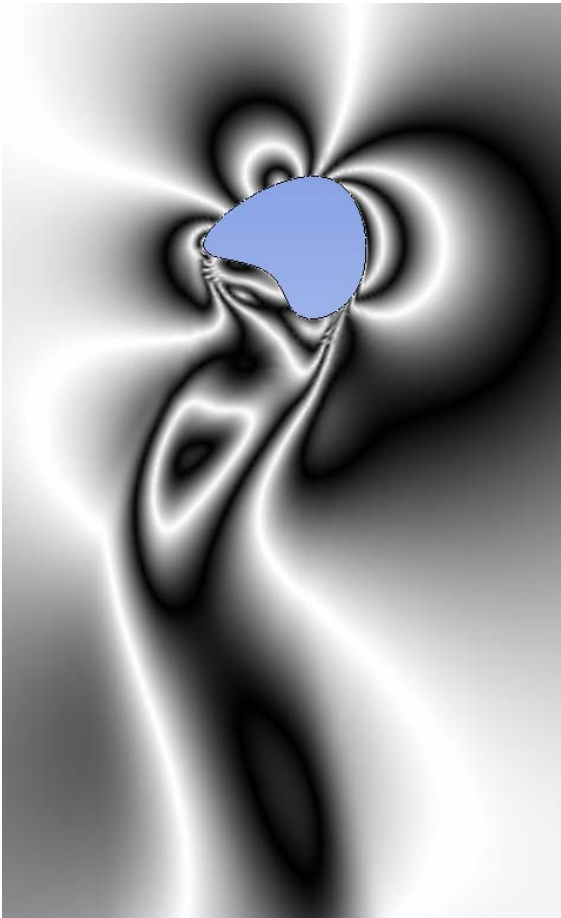
Для пульсаційних складових вітрового впливу запропонуємо наступні вирази:

$$\tilde{f}_x(z, \theta, t, \tau) = 2 \cdot I_u(z) \cdot \tilde{F}_x(z, \theta, t) \cdot \tilde{\gamma}_G(\tau) + \tilde{\Delta}_x(\tau), (4)$$

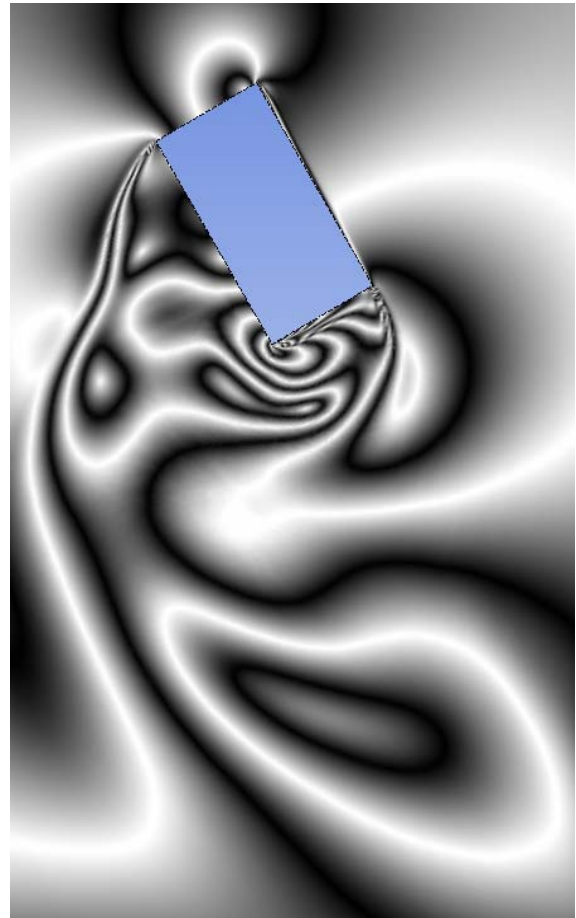
$$\tilde{f}_y(z, \theta, t, \tau) = 2 \cdot I_u(z) \cdot \tilde{F}_y(z, \theta, t) \cdot \tilde{\gamma}_G(\tau) + \tilde{\Delta}_y(\tau), (5)$$

$$\tilde{m}_z(z, \theta, t, \tau) = 2 \cdot I_u(z) \cdot \tilde{M}_z(z, \theta, t) \cdot \tilde{\gamma}_G(\tau) + \tilde{\Delta}_z(\tau), (6)$$

а)

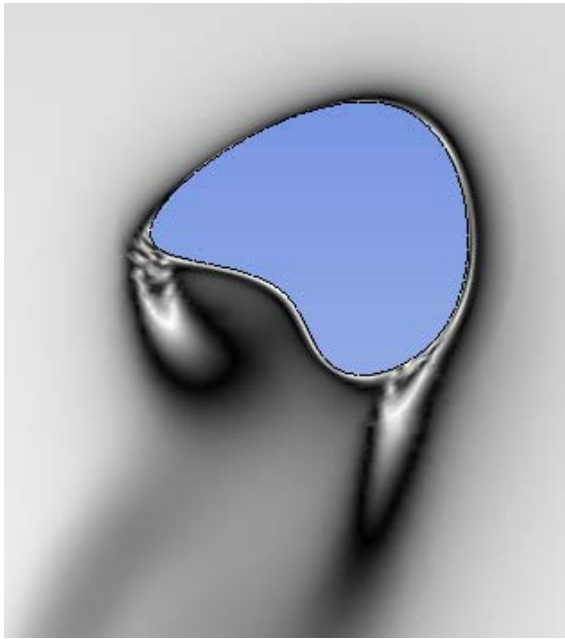


б)

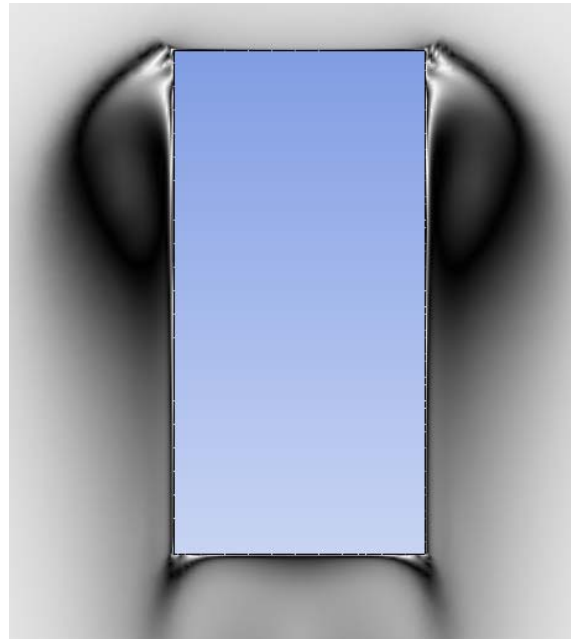


**Рисунок 1.** Обтікання вітровим потоком тіл різної геометричної форми: а) тіло несиметричної форми у плані; б) тіло з однією віссю симетрії.

а)



б)



**Рисунок 2.** Відрив потоку при обтіканні тіл різної геометричної форми: а) тіло несиметричної форми у плані; б) тіло з однією віссю симетрії.

де  $I_u(z) = \sigma_u / U_z(z)$  – інтенсивність турбулентності у напрямі вітрового потоку;

$\tilde{\gamma}_G(\tau)$  – нормальний стаціонарний випадковий процес з нульовим середнім та одиничним стандартом.

Формули (4)–(6), без урахування функції  $\tilde{\Delta}(\tau)$ , формують сучасну математичну модель динамічної складової вітрового навантаження. Обмеженістю такого подання є те, що величина цього навантаження не залежить від параметрів поперечної і вертикальної компонент турбулентності. З методологічної точки зору це не зовсім вірно, так як всі компоненти кореляційно пов'язані і, відповідно, кожна з них впливає на загальну оцінку вітрового навантаження. Утім для широкого класу споруд вплив компонент  $\tilde{v}(\tau)$  і  $\tilde{w}(\tau)$  є несуттєвим і для спрощення розрахунків ними можна знехтувати. Зважаючи на те, що висотні споруди відносяться до класу вертикально-континуальних споруд, з нехтуванням компоненти  $\tilde{w}(\tau)$  можна погодитися, але характеристики поперечної турбулентності можуть суттєво підсилювати вплив поздовжньої компоненти. Керуючись саме цими міркуваннями, ми доповнили формули (4)–(6) функцією  $\tilde{\Delta}(\tau)$ . Аналітичний вигляд цієї функції та ступінь її впли-

ву на динамічну добавку вітрового навантаження і вивчатимуться в рамках даної роботи. Тут тільки відмітимо, що на необхідність такого узагальненого підходу неодноразово зверталась увага в публікаціях італійських вчених [4–7, 22]. Проте внаслідок того, що ці роботи носили переважно якісний характер, зміст і величина функції на кшталт  $\tilde{\Delta}(\tau)$  так і залишились нерозкритими.

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо споруду із зосередженою масою довільної геометричної форми в плані. Призначимо три декартові системи координат із спільним початком у геометричному центрі маси (рис. 3): перша – базова система координат  $0x_b y_b$ , одиничні орти якої спрямовані по горизонталі та вертикалі; друга – синоптична система координат  $0x y$ , вісь абсцис якої паралельна напрямку середньої швидкості вітру  $U$  і повернута на кут  $\theta$  відносно  $0x_b y_b$ ; третя – змінна система координат  $0x' y'$ , із віссю абсцис спрямованою вздовж миттєвої швидкості вітру  $\tilde{U}_\Sigma(\tau)$  і повернутою на кут  $\Delta\theta$  відносно  $0x y$ . В рамках зроблених позначень запишемо наступні співвідношення:

$$\tilde{U}_u(\tau) = U + \tilde{u}(\tau), \tilde{V}_v(\tau) = \tilde{v}(\tau), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_\Sigma(\tau) &= \sqrt{\tilde{U}_u^2(\tau) + \tilde{V}_v^2(\tau)} = \\ &= \sqrt{[U + \tilde{u}(\tau)]^2 + \tilde{v}^2(\tau)}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{\theta} &= \arctg\{\tilde{v}(\tau)/[U + \tilde{u}(\tau)]\}, \\ \tilde{\theta}_\Sigma &= \theta + \Delta\tilde{\theta}, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\tilde{u}(\tau)$  та  $\tilde{v}(\tau)$  – випадкові процеси поздовжньої та поперечної компонент пульсаційної швидкості вітру (середню складову вважаємо детермінованою).

У загальному випадку дія вітру на масу провокуватиме появу аеродинамічних сил за відповідними осями та крутильного моменту (рис. 3):

$$\tilde{F}_D^\Sigma(\tau) = F_D + \tilde{f}_D(\tau), \tilde{F}_L^\Sigma(\tau) = F_L + \tilde{f}_L(\tau), \quad (10)$$

$$\tilde{F}_x^\Sigma(\tau) = F_x + \tilde{f}_x(\tau), \tilde{F}_y^\Sigma(\tau) = F_y + \tilde{f}_y(\tau), \quad (11)$$

$$\tilde{M}_z^\Sigma(\tau) = M_z + \tilde{m}_z(\tau), \quad (12)$$

де впливи  $F_x, F_y, F_D, F_L$  та  $M_z$  спричиняє дія середнього вітру, а  $\tilde{f}_x(\tau), \tilde{f}_y(\tau), \tilde{f}_D(\tau), \tilde{f}_L(\tau)$  та  $\tilde{m}_z(\tau)$  – його турбулентні пульсації.

Відмінність між силами (11), (10) і необхідність їх окремого розгляду пояснюється тим, що перші з них не враховують поперечних пульсацій вітру, які, як відомо, можуть підсилювати реакцію споруд вздовж та поперек вітрового потоку, хоча очевидно, що дана реакція повинна завжди братися до уваги. Особливо це стосується тих випадків, коли споруда має чітко виражену асиметричну форму. У зв'язку з цим, є необхідним дати більш коректну оцінку аеродинамічним силам  $\tilde{F}_x^\Sigma(\tau)$  та  $\tilde{F}_y^\Sigma(\tau)$  в контексті вектора миттєвої швидкості вітру  $\tilde{U}_\Sigma(\tau)$ . На підставі геометричних залежностей рисунка 3 для  $\tilde{F}_x^\Sigma(\tau)$  та  $\tilde{F}_y^\Sigma(\tau)$  матимемо наступні співвідношення:

$$\tilde{F}_x^\Sigma(\tau) = \tilde{F}_D^\Sigma(\tau) \cdot \cos(\Delta\tilde{\theta}) + \tilde{F}_L^\Sigma(\tau) \cdot \sin(\Delta\tilde{\theta}), \quad (13)$$

$$\tilde{F}_y^\Sigma(\tau) = \tilde{F}_L^\Sigma(\tau) \cdot \cos(\Delta\tilde{\theta}) - \tilde{F}_D^\Sigma(\tau) \cdot \sin(\Delta\tilde{\theta}). \quad (14)$$

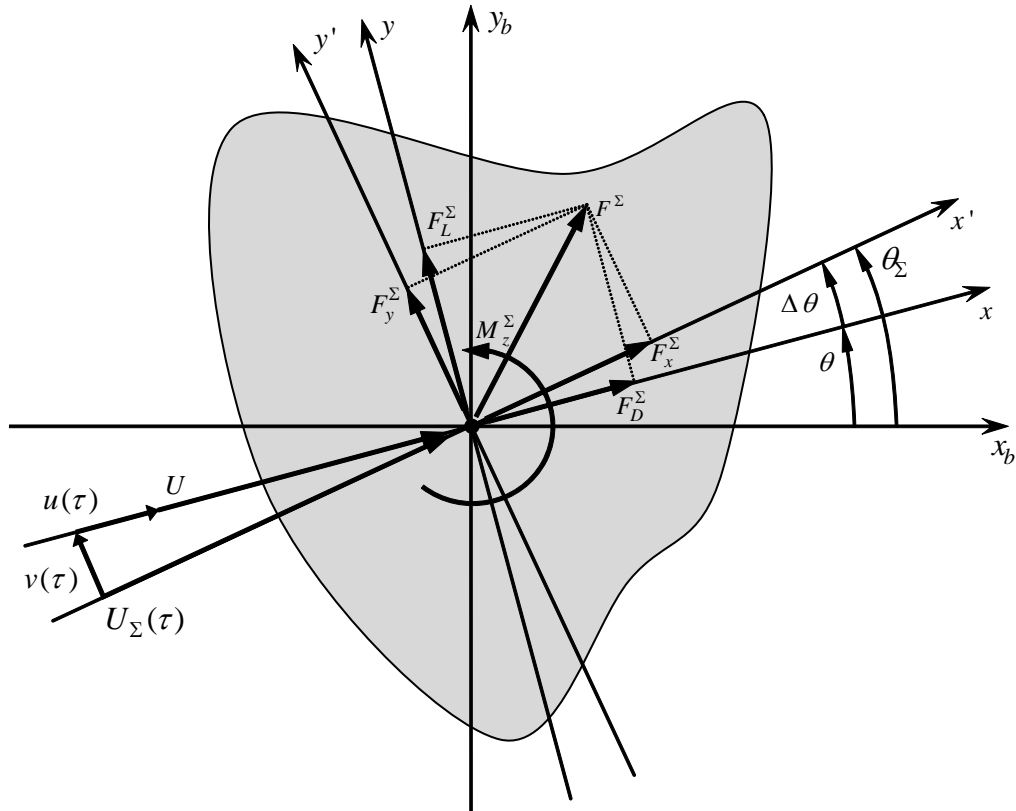


Рисунок 3. Співвідношення змінних у часі аеродинамічних впливів і швидкостей вітру.

Враховуючи, що при малих кутах  $\Delta\tilde{\theta}$  можна покласти  $\sin[\Delta\tilde{\theta}(\tau)] \cong \Delta\tilde{\theta}(\tau)$  і  $\cos[\Delta\tilde{\theta}(\tau)] \cong 1$ , вирази (13), (14) перепишемо у більш простій формі:

$$\tilde{F}_x^\Sigma(\tau) = \tilde{F}_D^\Sigma(\tau) + \tilde{F}_L^\Sigma(\tau) \cdot \Delta\tilde{\theta},$$

$$\tilde{F}_y^\Sigma(\tau) = \tilde{F}_L^\Sigma(\tau) - \tilde{F}_D^\Sigma(\tau) \cdot \Delta\tilde{\theta}. \quad (15)$$

Підставимо в отримані вирази залежності (10) і (11), логічно покладаючи  $F_D = F_x$  та  $F_L = F_y$  (в силу того, що вектор середньої швидкості вітру не змінює свого напрямку). Після ряду елементарних спрощень для пульсаційної складової вітрового навантаження будемо мати [38, 39]:

$$\tilde{f}_x(\tau) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_D(\theta) \times \left[ 2 \cdot \frac{\tilde{u}(\tau)}{U} + \frac{C_L(\theta)}{C_D(\theta)} \cdot \Delta\tilde{\theta} + 2 \cdot \frac{\tilde{u}(\tau)}{U} \cdot \frac{C_L(\theta)}{C_D(\theta)} \cdot \Delta\tilde{\theta} \right], \quad (16)$$

$$\tilde{f}_y(\tau) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_D(\theta) \times \left[ 2 \cdot \frac{\tilde{u}(\tau)}{U} \cdot \frac{C_L(\theta)}{C_D(\theta)} - \Delta\tilde{\theta} - 2 \cdot \frac{\tilde{u}(\tau)}{U} \cdot \Delta\tilde{\theta} \right]. \quad (17)$$

Використаємо формульне визначення (9) для кута  $\Delta\tilde{\theta}$ , попередньо скориставшись відомим тригонометричним співвідношенням для малих кутів  $\arctg(x) \approx x$ , і беручи до уваги загальноприйнятту думку [5, 40, 41] стосовно малості відношення  $\tilde{u}(\tau)/U$ :

$$\tilde{f}_x(\tau) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_D(\theta) \times \left[ 2 \cdot \frac{\tilde{u}(\tau)}{U} + \frac{\tilde{v}(\tau)}{U} \cdot \frac{C_L(\theta)}{C_D(\theta)} + 2 \cdot \frac{\tilde{u}(\tau) \cdot \tilde{v}(\tau)}{U^2} \cdot \frac{C_L(\theta)}{C_D(\theta)} \right], \quad (18)$$

$$\tilde{f}_y(\tau) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_D(\theta) \times \left[ 2 \cdot \frac{\tilde{u}(\tau)}{U} \cdot \frac{C_L(\theta)}{C_D(\theta)} - \frac{\tilde{v}(\tau)}{U} - 2 \cdot \frac{\tilde{u}(\tau) \cdot \tilde{v}(\tau)}{U^2} \right]. \quad (19)$$

Оскільки при сильних вітрах, які є звичайно найбільш цікавими для інженерних розрахунків, відношення  $\tilde{u}(\tau) \cdot \tilde{v}(\tau)/U^2$  в рідких випадках перевищує 0,05, то останніми складовими формул (18), (19) можна знехтувати, що приведе лише до невеликої помилки у виразах:

$$\tilde{f}_x(\tau) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_D(\theta) \times$$

$$\times \left[ 2 \cdot \frac{\tilde{u}(\tau)}{U} + \frac{\tilde{v}(\tau)}{U} \cdot \frac{C_L(\theta)}{C_D(\theta)} \right], \quad (20)$$

$$\tilde{f}_y(\tau) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_D(\theta) \times \left[ 2 \cdot \frac{\tilde{u}(\tau)}{U} \cdot \frac{C_L(\theta)}{C_D(\theta)} - \frac{\tilde{v}(\tau)}{U} \right]. \quad (21)$$

Якщо представити випадкові процеси  $\tilde{u}(\tau)$ ,  $\tilde{v}(\tau)$  відповідно як  $\sigma_u \cdot \tilde{\gamma}_{G,u}(\tau)$  та  $\sigma_v \cdot \tilde{\gamma}_{G,v}(\tau)$ , де  $\tilde{\gamma}_{G,u}$ ,  $\tilde{\gamma}_{G,v}$  – незалежні нормальні випадкові процеси з нульовим середнім і одиничним стандартом, то вирази (20) та (21) можна буде переписати у більш лаконічній інтерпретації:

$$\tilde{f}_x(\tau) = 2 \cdot F_x \cdot I_u \times \left[ \tilde{\gamma}_{G,u}(\tau) + \frac{1}{2} \cdot \tilde{\gamma}_{G,v}(\tau) \cdot e_\sigma \cdot \frac{C_L(\theta)}{C_D(\theta)} \right], \quad (22)$$

$$\tilde{f}_y(\tau) = 2 \cdot F_x \cdot I_u \times \left[ \tilde{\gamma}_{G,u}(\tau) \cdot \frac{C_L(\theta)}{C_D(\theta)} + \frac{1}{2} \cdot \tilde{\gamma}_{G,v}(\tau) \cdot e_\sigma \right]. \quad (23)$$

Коефіцієнт  $e_\sigma = \sigma_v / \sigma_u$  є відношенням стандартів пульсацій поперечної і поздовжньої компонент турбулентності вітрового потоку. Відомо, що обидва стандарти пульсацій не залежать від висоти, тому для однакових вітрових режимів місцевості це відношення буде константою.

Зіставивши вирази (22), (23) відповідно із виразами (4)–(6), дамо формульне визначення раніше введеним величинам  $\tilde{\Delta}_x(\tau)$ ,  $\tilde{\Delta}_y(\tau)$  і  $\tilde{\Delta}_z(\tau)$ :

$$\tilde{\Delta}_x(\tau) = F_x \cdot I_u \cdot \tilde{\gamma}_{G,v}(\tau) \cdot e_\sigma \cdot C_L(\theta) / C_D(\theta), \quad (24)$$

$$\tilde{\Delta}_y(\tau) = F_x \cdot I_u \cdot \tilde{\gamma}_{G,v}(\tau) \cdot e_\sigma, \quad (25)$$

$$\tilde{\Delta}_z(\tau) = 0. \quad (26)$$

## Висновки

Вирази (4)–(6) у поєднанні із (24)–(26) виражають зміст запропонованого підходу. На відміну від класичної моделі, коли поправки  $\tilde{\Delta}_x(\tau)$ ,  $\tilde{\Delta}_y(\tau)$  вважаються рівними нулю, можна бачити, що пульсаційна складова вітрового навантаження може суттєво підсилуватись попе-

речною турбулентністю. При цьому вздовж потоку це підсилення буде пропорційне коефіцієнту підйомної сили, а поперек – визначатиметься тільки статистичними характеристиками турбулентності. Якщо напрям середньої швидкості вітру є паралельним площині, що проходить через вісь жорсткості тіла у напрямі потоку, тобто вісь  $x-x$  (рис. 3) виступає його вісю симетрії, то підсилення реакції вздовж

потoku не буде і вираз (22) відповідатиме класичній інтерпретації динамічного впливу. Що стосується підсилення реакції поперек потоку, то незалежно від аеродинамічних властивостей тіла вона завжди впливатиме на спектр зусиль в конструкціях, викликаних вітровим навантаженням, а це, як відомо, підтверджується експериментальними дослідженнями.

## Література

1. Chen, X. Dynamic Wind Effects on Buildings with 3D Coupled Modes: Application of High Frequency Force Balance Measurements [Текст] / X. Chen, A. Kareem // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2005. – Vol. 131. – P. 1115–1125.
2. Holmes, J. D. Wind loading of structures [Текст] / J. D. Holmes. – Great Britain : Eastbound, 2005. – 356 p.
3. Kareem, A. Lateral-torsional Motion of Tall Buildings to Wind Loads [Текст] / A. Kareem // *Journal of Structural Engineering*. – 1985. – Vol. 111. – P. 2479–2496.
4. Piccardo, G. A Refined Model for Calculating 3-D Equivalent Static Wind Forces on Structures [Текст] / G. Piccardo, G. Solari // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1996. – № 65. – P. 21–30.
5. Piccardo, G. Closed Form Prediction of 3-D Wind-Excited Response of Slender Structures [Текст] / G. Piccardo, G. Solari // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1998. – № 74–76. – P. 697–708.
6. Piccardo, G. 3-D Gust Effect Factor for Slender Vertical Structures [Текст] / G. Piccardo, G. Solari // *Probabilistic Engineering Mechanics*. – 2002. – № 17. – P. 143–155.
7. Piccardo, G. 3D Wind-Excited Response of Slender Structures: Closed-Form Solution [Текст] / G. Piccardo, G. Solari // *Journal of Structural Engineering*. – 2000. – Vol. 126, № 8. – P. 936–943.
8. Solari, G. 3-D Response of Buildings to Wind Action [Текст] / G. Solari // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1986. – № 23. – P. 379–393.
9. Vickery, B. J. Across-wind Vibrations of Structures of Circular Cross-section. Part I: Development of a mathematical model for two-dimensional conditions [Текст] / B. J. Vickery // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1983. – № 12. – P. 49–74.
10. Brian, W. Smith. Communication Structures [Текст] / W. Smith Brian. – London : Thomas Telford Ltd., 2007. – 338 p.
11. Davenport, A. G. Gust Loading Factors [Текст] / A. G. Davenport // *Journal of the Structural Division*. – 1967. – Vol. 93, № 3. – P. 11–34.

## References

1. Chen, X.; Kareem, A. Dynamic Wind Effects on Buildings with 3D Coupled Modes: Application of High Frequency Force Balance Measurements. In: *Journal of Engineering Mechanics*, 2005, Vol. 131, p. 1115–1125.
2. Holmes, J. D. Wind loading of structures. Great Britain: Eastbound, 2005. 356 p.
3. Kareem, A. Lateral-torsion Motion of Tall Buildings to Wind Loads. In: *Journal of Structural Engineering*, 1985, Vol. 111, p. 2479–2496.
4. Piccardo, G.; Solari, G. A Refined Model for Calculating 3-D Equivalent Static Wind Forces on Structures. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, № 65, p. 21–30.
5. Piccardo, G.; Solari, G. Closed Form Prediction of 3-D Wind-Excited Response of Slender Structures. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, № 74–76, p. 697–708.
6. Piccardo, G.; Solari, G. 3-D Gust Effect Factor for Slender Vertical Structures. In: *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2002, № 17, p. 143–155.
7. Piccardo, G.; Solari, G. 3D Wind-Excited Response of Slender Structures: Closed-Form Solution. In: *Journal of Structural Engineering*, 2000, Vol. 126, № 8, p. 936–943.
8. Solari, G. 3-D Response of Buildings to Wind Action. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986, № 23, p. 379–393.
9. Vickery, B. J. Across-wind Vibrations of Structures of Circular Cross-section. Part I: Development of a mathematical model for two-dimensional conditions. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, № 12, p. 49–74.
10. Brian, W. Smith. Communication Structures. London: Thomas Telford Ltd., 2007. 338 p.
11. Davenport, A. G. Gust Loading Factors. In: *Journal of the Structural Division*, 1967, Vol. 93, № 3, p. 11–34.
12. Davenport, A. G. The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures. In: *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, 1961, № 19, p. 449–472.
13. Holmes, J. D. Along-Wind Response of Lattice Towers: Part III – Effective load distribution. In: *Engineering Structures*, 1996, Vol. 18, p. 489–494.
14. Kareem, A. Fluctuating wind loads on buildings. In: *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1982, Vol. 108, p. 1086–1102.

12. Davenport, A. G. The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures [Текст] / A. G. Davenport // Proc. Instn. Civ. Engrs. – 1961. – Volume 19, Issue 4. – P. 449–472.
13. Holmes, J. D. Along-Wind Response of Lattice Towers: Part III – Effective load distribution [Текст] / J. D. Holmes // Engineering Structures. – 1996. – Vol. 18. – P. 489–494.
14. Kareem, A. Fluctuating wind loads on buildings [Текст] / A. Kareem // Journal of the Engineering Mechanics Division. – 1982. – Vol. 108. – P. 1086–1102.
15. Kareem, A. Wind-excited Response of Buildings in Higher Modes [Текст] / A. Kareem // Journal of the Structural Division. – 1981. – Volume 107. – P. 701–706.
16. Katsumura, A. Universal Wind Load Distribution Reproducing Maximum Load Effects on Structural Members [Текст] / A. Katsumura, Y. Tamura, O. Nakamura // Proceedings of the 5th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications / K. R. Cooper, National Research Council of Canada Aerodynamics Laboratory. – Ottawa, Canada : Elsevier, 2004. – P. 351–354.
17. Repetto, M. P. Equivalent Static Wind Actions on Vertical Structures [Текст] / M. P. Repetto, G. Solari // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – Vol. 91, № 12–15. – P. 335–357.
18. Simiu, E. Equivalent Static Wind Loads for Tall Buildings Design [Текст] / E. Simiu // Journal of the Structural Division. – 1976. Volume 102. – P. 719–737.
19. Simiu, E. Revised Procedure for Estimating Along-wind Response [Текст] / E. Simiu // Journal of the Structural Division, ASCE 106. – 1980. – P. 1–10.
20. Solari, G. Along-wind Response Estimation: Closed Form Solution [Текст] / G. Solari // Journal of the Structural Division. – 1982. – Volume 108. – P. 225–244.
21. Solari, G. Analytical Estimation of the Along-wind Response of Structures [Текст] / G. Solari // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1983. – № 14. – P. 467–477.
22. Wood, C. J. A Simplified Calculation Method for Gust Factors [Текст] / C. J. Wood // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1983. – № 6. – P. 385–388.
23. Zhou, Y. Along-wind Static Equivalent Wind Loads and Response of Tall Buildings. Part I: Unfavorable Distributions of Static Equivalent Wind Loads. Part II: Effects of mode shape [Текст] / Y. Zhou, M. Gu, H. Xiang // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1999. – № 79. – P. 135–158.
24. Zhou, Y. Gust Loading Factor: New Model [Текст] / Y. Zhou, A. Kareem // Journal of Structural Engineering. – 2001. – Vol. 127, № 2. – P. 168–175.
25. СНиП 2.01.07-85\*. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия [Текст]. – Взамен главы СНиП II-6-74 ; введ. 1987-01-01. – М. : ФГУП ЦПП, 2005. – 44 с.
15. Kareem, A. Wind-excited Response of Buildings in Higher Modes. In: *Journal of the Structural Division*, 1981, Volume 107, p. 701–706.
16. Katsumura, A.; Tamura, Y.; Nakamura, O. Universal Wind Load Distribution Reproducing Maximum Load Effects on Structural Members. In: *Proceedings of the 5th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications*. Ottawa, Canada: Elsevier, 2004, p. 351–354.
17. Repetto, M. P.; Solari, G. Equivalent Static Wind Actions on Vertical Structures. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, Vol. 91, № 12–15, p. 335–357.
18. Simiu, E. Equivalent Static Wind Loads for Tall Buildings Design. In: *Journal of the Structural Division*, 1976, Volume 102, p. 719–737.
19. Simiu, E. Revised Procedure for Estimating Along-wind Response. In: *Journal of the Structural Division*, 1980, Volume 106, p. 1–10.
20. Solari, G. Along-wind Response Estimation: Closed Form Solution. In: *Journal of the Structural Division*, 1982, Volume 108, p. 225–244.
21. Solari, G. Analytical Estimation of the Along-wind Response of Structures. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, № 14, p. 467–477.
22. Wood, C. J. A Simplified Calculation Method for Gust Factors. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, № 6, p. 385–388.
23. Zhou, Y.; Gu, M.; Xiang, H. Along-wind Static Equivalent Wind Loads and Response of Tall Buildings. Part I: Unfavorable Distributions of Static Equivalent Wind Loads. Part II: Effects of mode shape. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, № 79, p. 135–158.
24. Zhou, Y.; Kareem, A. Gust Loading Factor: New Model. In: *Journal of Structural Engineering*, 2001, Vol. 127, № 2, p. 168–175.
25. SNiP 2.01.07-85\*. Construction rules and regulations. Loads and effects. Moscow: FGUP TsPP, 2005. 44 p. (in Russian)
26. DBN V.1.2-2:2006. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 78 p. (in Ukrainian)
27. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–4: General actions – Wind actions. – Ref. No. EN 1991-1-4:2005 (E). Brussels: CEN, 2005. 146 p.
28. CSA S37-01 (R2006). Antennas, Towers and Antenna-Supporting Structures. – Rexdale, Canada: Canadian Standards Association, 2006. 154 p.
29. AS 3995-1994. Design of Steel Lattice Towers and Masts. – Sydney, Australia: Standards Australia, 1994. – 64 p.
30. Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 3-1. Towers, masts and Chimneys – Towers and Masts. Brussels, Belgium: CEN, 2006. 79 p.
31. BS 8100-4:1995. Lattice Towers and Masts. Part 4. Code of practice for loading of guyed masts. – London, England: British Standards Institution, 1995. – 88 p.



26. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. – Замість СНиП 2.01.07-85 ; надано чинності 2007-01-01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 78 с.
27. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions [Текст]. – Ref. No. EN 1991-1-4:2005 (E). – Brussels : CEN, 2005. – 146 p.
28. CSA S37-01 (R2006). Antennas, Towers and Antenna-Supporting Structures [Текст]. – Originally published May 2001; Revisions issued: Update No. 1 – June 2004; Update No. 2 – January 2006. – Rexdale, Canada : Canadian Standards Association, 2006. – 154 p.
29. AS 3995-1994. Design of Steel Lattice Towers and Masts [Текст]. – First published as AS 3995(Int) – 1991, Revised and designated AS 3995 – 1994. – Sydney, Australia : Standards Australia, 1994. – 64 p.
30. Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 3-1. Towers, masts and Chimneys – Towers and Masts [Текст]. – Brussels, Belgium : CEN, 2006. – 79 p.
31. BS 8100-4:1995. Lattice Towers and Masts. Part 4. Code of practice for loading of guyed masts [Текст]. – Execute Date 1995-2-15. – London, England : British Standards Institution, 1995. – 88 p.
32. BS 6399-2:1997. Loading for buildings. Code of practice for wind loads [Текст]. – Publication Date 15 July 1997. – London, England : British Standards Institution, 1997. – 126 p.
33. ASCE 7-10. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures [Текст]. – Published 05-12-2010. – Virginia, USA : American Society of Civil Engineers, 2010. – 658 p. – ISBN 978-0-7844-1085-1.
34. NBCC (2005). National Building Code of Canada [Текст]. – Ottawa, Canada : Canadian Commission on Building and Fire Codes, National Research Council of Canada, 2005. – 1167 p. – ISBN 0-660-19426-0.
35. NBCI:2005. National Building Code of India 2005 [Текст]. – Second revision 2005. – New Delhi, India : Bureau of Indian Standards, 2005.
36. AS/NZS 1170.2:2011. Structural Design Actions. Part 2 – Wind Actions [Текст]. – Second edition 2011. – Sydney, Australia : Standards Australia, 2011. – 95 p. – ISBN 978-0-7337-9805-4.
37. Махінько, А. В. Імовірнісний розрахунок баштових опор зв'язку [Текст] : [монографія] / А. В. Махінько. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – 409 с.
38. Махінько, А. В. Надійність металевих баштових опор зв'язку [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / А. В. Махінько. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – 40 с.
39. Simiu, E. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design [Текст] / E. Simiu, R. H. Scanlan. – 3rd Edition. – New York : John Wiley & Sons, 1996. – 704 p. – ISBN 0-471-12157-6.
40. Solari, G. Probabilistic 3-D Turbulence Modeling for Gust Buffeting of Structures [Текст] / G. Solari, M. P. Repetto // Probabilistic Engineering Mechanics. – 2001. – № 16. – P. 73–86.
41. BS 6399-2:1997. Loading for buildings. Code of practice for wind loads. London, England: British Standards Institution, 1997. 126 p.
42. ASCE 7-10. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2010. 658 p. ISBN 978-0-7844-1085-1.
43. NBCC (2005). National Building Code of Canada. Ottawa, Canada: Canadian Commission on Building and Fire Codes, National Research Council of Canada, 2005. 1167 p. ISBN 0-660-19426-0.
44. NBCI:2005. National Building Code of India 2005. New Delhi, India: Bureau of Indian Standards, 2005. 1161 p. ISBN 81-7061-026-5.
45. AS/NZS 1170.2:2011. Structural Design Actions. Part 2 – Wind Actions. Second edition 2011. Sydney, Australia: Standards Australia, 2011. 95 p. ISBN 978-0-7337-9805-4.
46. Makhinko, A. B. Probabilistic Design of Communication Towers. Monograph. Poltava: PoltNTU, 2012. 409 p. (in Ukrainian)
47. Makhinko, A. B. Durability of tower support of joining: Doctoral authors thesis: speciality 05.23.01 «Engineering constructions, buildings and structures». Poltava: PoltNTU, 2012. 40 p. (in Ukrainian)
48. Simiu, E.; Scanlan, R. H. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. New York : John Wiley & Sons, 1996. 704 p. ISBN 0-471-12157-6.
49. Solari, G.; Repetto, M. P. Probabilistic 3-D Turbulence Modeling for Gust Buffeting of Structures. In: *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2001, № 16, p. 73–86.

**Пічугін Сергій Федорович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри конструкцій з металу, дерева та пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: розвиток загальної методики оцінки надійності елементів будівельних конструкцій і статично невизначених систем. Опис випадкових навантажень у різних імовірнісній техніці. Розв'язання задачі сполучення навантажень. Оцінка технічного стану і проектування металевих конструкцій. Участь у розробці будівельних норм проектування.

**Махінько Антон Володимирович** – д. т. н., с.н.с. зі спеціальності 05.23.01 – будівельні конструкції, здания и сооружения. Завідувач проектно-конструкторським відділом ТОВ «ЕТУАЛЬ». Наукові інтереси: методи оцінки проектної й експлуатаційної надійності будівельних конструкцій. Опис випадкових навантажень у різних імовірнісній техніці. Розв'язання задач сполучення навантажень. Математичні методи опису відмов будівельних конструкцій.

**Пичугин Сергей Фёдорович** – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой конструкций из металла, дерева и пластмасс Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Академик Академии строительства Украины. Научные интересы: развитие общей методики оценки надёжности элементов строительных конструкций и статически неопределимых систем. Описание случайных нагрузок в различной вероятностной технике. Решение задачи сочетаний нагрузок. Оценка технического состояния и проектирование металлических конструкций. Участие в разработке строительных норм проектирования.

**Махінько Антон Владимирович** – д. т. н., с.н.с. по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. Заведующий проектно-конструкторским отделом ТОВ «ЕТУАЛЬ». 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.

**Pichugin Sergey** – DSc (Eng), Professor; head of Department of Metal and Wooden Structures, Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. Academician of Construction Academy of Ukraine. Scientific interests: development of general technique of reliability estimation of elements of building structures and statically indefinable systems. The description of stochastic loads in various probabilistic techniques. The decision of loads combination problem. The estimation of a technical condition of metal structures and designing of metal structures. Participation in development of Building Codes.

**Makhinko Anton** – Doctor in Engineering Sciences, head of design and engineering department of building company «Etual». 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 de-scription of the building structures failure.