

УДК 532.5+51-7

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2021/4.5>

Кізілова Н. М., д. ф.-м. н., проф.
Ричак Н. Л., к. геогр. н., доцент

N. M. Kizilova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
N. L. Rychak, PhD (Geogr.), docent

Математичне моделювання впливу шквального вітру на технічні та рослинні структури на урбанізованих територіях

Mathematical modeling of influence of strong winds on technical and plant structures on urban areas

¹Харківський національний університет
ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна,
e-mail: n.kizilova@gmail.com
²Харківський національний університет
ім. В.Н. Каразіна, Харків, пл. Свободи, 4,
e-mail: rychak@ukr.net

¹V.N. Karazin Kharkiv National University, 61022,
Kharkov, Svobody sq., 4,
e-mail: n.kizilova@gmail.com
²V.N. Karazin Kharkov National University,
61022, Kharkov, Svobody sq., 4,
e-mail: rychak@ukr.net

Штормові події останніх років показали, що особливу загрозу складає руйнівний вплив вітру на міські технічні споруди та рослині насадження. В доній роботі наведений огляд математичних моделей і підходів до експериментального і теоретичного дослідження проблем, пов'язаних з впливом шквального вітру і торнадо на урбанізованих територіях. Наведені комп'ютерні симуляції вітрової дії на стандартні багатопверхівки мікрорайонів України. Обчислені коефіцієнти нормальних та зсувних компонент сил і моментів сил, які діють на поверхні будинків, а також вихрові сліди та території мікрорайонів при різних швидкостях вітру від помірних до шквальних. Розрахунки проведені методом скінчених елементів з використанням моделі турбулентної течії повітря в пакеті AnSys2020. Показано, як за допомогою незначної зміни форми (даху, додаткові проходи, щити) можна зменшити руйнівний вплив вітру на будинки і загрозу життю людей.

Ключові слова: глобальні зміни клімату, шквальний вітер, торнадо, математичне моделювання, руйнування конструкцій.

Stormy events in recent years have shown that the destructive effects of wind on urban technical structures and plants pose a special threat. The paper provides an overview of mathematical models and approaches to experimental and theoretical studies of the problems associated with the effects of wind gusts and tornadoes on urban areas. Computer simulations of wind action on standard multistorey buildings in Ukraine are given. The coefficients of normal and shear components of forces and moments of forces acting on the surface of buildings, as well as vortex tracks over the residential complex at different wind speeds from moderate to severe have been computed. The calculations were performed by the finite element method using the model of turbulent air flow in the package AnSys2020. It is shown how with the help of a slight change in shape (roofs, additional passages, shields) the destructive effects of wind on the buildings and plants, as well as the threat to human life can be reduced.

Key words: global climate change, gusts of wind, tornadoes, mathematical modeling, destruction of structures.

Статтю представив член-кореспондент НАН України Жук Я. О.

1. Вступ

Глобальні зміни клімату, які поступово відбуваються в останні роки за рахунок природних та антропогенних факторів, призвели до підвищення середньорічної температури атмосфери, випаровування води з океанів, температури і солоності річок, озер, морів, прискорення танення глетчерів Антарктиди і Гренландії. Це викликає раптові

зміни тиску і температури, підвищення швидкості вітру, кількості опадів, негативно впливає як на здоров'я людини, так і на існування цілих видів тварин і рослин, які не пристосовані до нових природних умов [1]. Значну роль у прогнозуванні несприятливих атмосферних явищ та розробці мір їх попередження грає математичне моделювання

як на рівні локальних територій і річкових систем [2,3], так і на рівні країн, земель, материків і планети в цілому. Особливо велике значення має дослідження впливу різких змін температури, тиску і шквальних вітрів на територіях міст, в яких зараз мешкає більше 50% населення Землі, а в 2050 р. цей показник прогнозується на рівні 70% [1].

В роботі наведений стислий огляд сучасних математичних моделей динаміки рідини для аналізу впливу сильного вітру на міські технічні споруди і масиви дерев, які виконані для конкретних ділянок на території м. Харкова та їх геометричних моделей з використанням даних сервісу GoogleEarth.

2. Огляд математичних моделей і підходів

Аеродинаміка грає фундаментальну роль у дослідженні вітрових навантажень, починаючи з піонерських досліджень [4], де було показано, що спричинене вітром механічне навантаження можна визначити в частотній області шляхом поєднання місцевої «трояди вітрів», локального вітру (вплив топографії місцевості), структурних аеродинамічних характеристик (густина, висота і форма будівель, Рис.1) та структурні динамічні властивості (розподіли маси, жорсткості, коефіцієнтів амортизації локальної «шорсткості» приміського шару повітря). В результаті поєднання всіх факторів (ланцюг Девенпорта) можна отримати сили $\vec{F}(t, \vec{r})$, які діють в даній локації (місцевість і геометрія міста). Цей підхід був використаний в якості базової аеродинамічної теорії для вітротехніки [5], механічних навантажень на малоповерхові [6] і високі призматичні будинки [7,8], і найбільш критичні випадків коли напрям вітру перпендикулярний до однієї з вертикальних граней будівлі, у наближеннях лінійної пружної [9] або нелінійної непружної структурної реакції [10], стаціонарного або змінного вітрового навантаження [11]. Більш складні моделі враховують не тільки потоки повітря, але й конвективних переніс опадів (дощ, сніг), вологість повітря, сонячну радіацію і забруднення [12,13], включаючи несподівано сильні дощі з вітром [14].

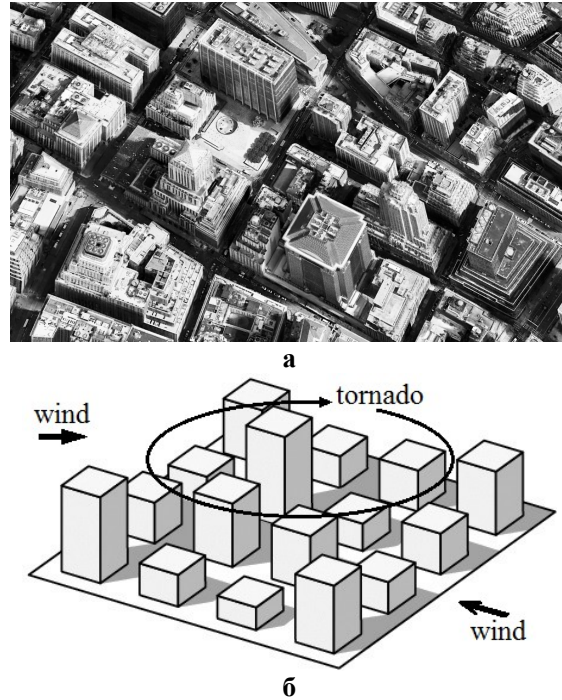


Рис.1. Масштабовані дані міської забудови (а) і відповідні блочні моделі (б).

Вітрове навантаження є випадковим процесом, і тому під час моделювання часто використовуються спектральні методи в частотній області і теорія випадкових вібрацій з можливістю використання результатів вимірювань в аеродинамічній трубі з різними режимами течій повітря. Для врахування несподіваних поривів вітру використовують різні апроксимації функції щільності ймовірності швидкості вітру [15]. Дані вимірювань на поверхнях будинків і їх моделях в аеродинамічній трубі, в симуляторах торнадо (tornado simulators) і мікропоривчастих вітрів (microburst simulators) показали, що ймовірнісні властивості вітрового тиску можуть сильно відрізнятися для різних геометрій і режимів вітру [15,16]. Значний вплив оказують турбулентні вихори, а також вихрові сліди, які виникають поза кожним з будинків і взаємодіють між собою. Нелінійні взаємодії цих слідів можуть призводити до формування когерентних (в просторі і за часом) структур, що веде до значного підсилення вітрового навантаження [17]. Як показали дослідження, вихровий слід будинку можна мати вигляд однієї пари вихрів, що обертаються протилежно (дипольний слід), або двох пар (квадрупольний слід), переходи між якими відбуваються зі зміною напрямку і сили вітру (Рис.2). Руйнівна

сила вітру часто пов'язана зі зриванням дахів, а її величина сильно залежить від висоти і форми даху [18]. За рахунок модифікації геометрії міської забудови можна досягнути ефекту захисту від вихрів, які викликані несподіваними сильними поривами вітру [19].

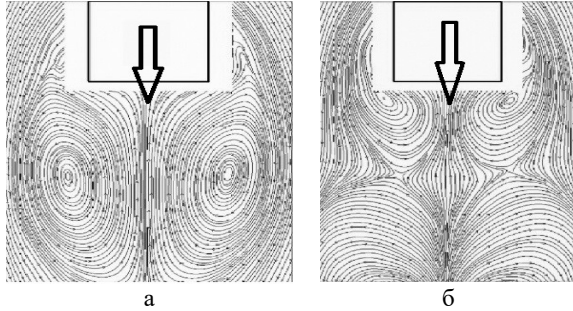


Рис.2. Вихрові сліди у повітрі за будинком у вигляді однієї (а) і двох (б) пар вихрів.

В останні роки у зв'язку з підвищенням цін на землю і прогресом будівельних технологій, світовим трендом стало будівництво висотних і надвисотних будинків, які є вразливими до вітрового навантаження через свою висоту і гнучкість. Використання легких будівельних матеріалів зробило їх ще більш сприйнятливими до вітрової вібрації, причому остатня стала основною проблемою для проектувальників, оскільки вона може пошкодити конструкції і викликати дискомфорт у мешканців. Неможливість обмежити цю вібрацію під час екстремальних вітрових штормів і торнадо може призвести до катастрофічних наслідків [16].

З класичної структурної динамічної теорії рівняння імпульсів для механічної структури має загальний вигляд [10]

$$[M] \cdot \frac{d^2 \bar{\theta}}{dt^2} + [C] \cdot \frac{d \bar{\theta}}{dt} + [N] \cdot \bar{\theta} = \bar{F}(t, \bar{r}), \quad (1)$$

де $\bar{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$ - вектор деформацій, T - транспонування, $[M]$, $[C]$ і $[N]$ - матриці мас-інерційних, коріолісових і гравітаційних коефіцієнтів.

Для оцінки впливу вітрового навантаження використовують коефіцієнти тертя $C_D = F_D / qA$, підйомної сили $C_L = F_L / qA$ і руйнівного моменту сил $C_M = F_M / qA$, де F_L і F_D - інтеграли нормальних і тангенціальних компонент сил, які діють на поверхню споруди, F_M - відповідні моменти сил, A - характерний поперечний переріз споруди, $q = \rho V^2 / 2$, ρ - густина повітря, V - характерна швидкість потоку повітря.

Найбільш популярними для розрахунків вітрових і температурних навантажень на міські споруди є методи скінчених елементів і граничних об'ємів, які дозволяють робити детальні чисельні розрахунки на складних геометрії (Рис.1) з використанням різних моделей турбулентності, а саме $k-\epsilon$ моделі Колмогорова та її модифікацій, Steady Reynolds Averaged Navier-Stokes, Large Eddy Simulation і Detached Eddy Simulation [20-23].

3. Постановка задачі і чисельні розрахунки

Розглядається вітрове навантаження на житлові багатоповерхівки з різною висотою і різними способами їх розташування на території на прикладі м. Харкова (Рис.3а) з відомою «розою вітрів» (Рис.3б). Схема розташування з відкритого ресурсу Google-maps розмішувалася в моделі аеродинамічної труби у вигляді паралелепіпеду з розмірами $x20 \times x100$ висотою і довжиною відповідно (Рис.3в). Розмір сітки складав 10×10 см з використанням функції inflation до усіх поверхонь будинків.

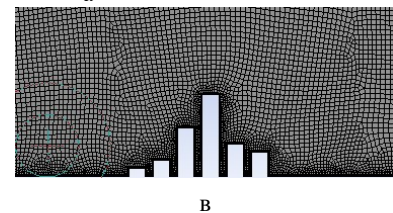
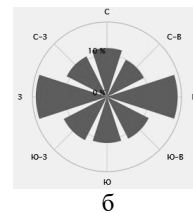


Рис.3. Типовий житловий мікрорайон м. Харкова (а) і напрямки вітру на місцевості (б).

Рівняння $k-\omega$ моделі турбулентного руху, яка описує турбулентний пристінний шар з достатньою точністю без введення додаткових демпфуючих функцій, мають вигляд

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + (\bar{u} \nabla)(\rho k) = \text{div}((\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k) + P - \beta^* \rho \omega k, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + (\bar{u} \nabla)(\rho \omega) = \text{div}((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega) + \frac{\alpha \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2,$$

де $\mu_t = \rho k / \omega$ - турбулентна в'язкість, $P = \tau_{ik} \partial u_i / \partial x_k$, τ_{ik} - тензор в'язких напружень, $\alpha = 5/9$, $\beta^* = 0.09$, $\beta = 0.075$, $\sigma_k = 0.5$, $\sigma_\omega = 0.5$.

Чисельні розрахунки проводились в пакеті AnSys Fluent 2020 R2 (ansys.com/ academic). Значення густини ρ і в'язкості μ повітря (air) обрані з бази даних Fluent database. Розрахунки значень k, ω і v_x, v_y, v_z проводилися за чисельними схемами 2-го порядку точності, а значень тиску – першого порядку. Градієнти функцій облічувалися за схемою least-square method. Ітерації проводилися до досягнення точності 10^{-4} . Якість сітки контролювалася функціями якості Fluent. Кількість скінченних елементів сітки складала $>2 \cdot 10^6$. На вході (inlet) задавалася постійна швидкість вітру $v_x=3.5-8$ м/с, що відповідає слабкому і помірному вітру, а на виході (outlet) – тиск $p=0$

4. Обговорення результатів розрахунків

Результати розрахунків гідродинамічного тиску в потоці повітря, яке діє на стінки будинків, наведені на Рис.4. Якщо стіни всіх будинків орієнтовані нормально до напрямку повітря, на фронтальні стіни першого ряду будинків діє максимальна сила. На стіни будинків другого та подальших рядів діють значно менші сили (Рис.4а). При ромбоєдричному порядку розташування будинків (Рис.4б) стіни всіх конструкцій зазнають значно менший силовий вплив. Оскільки на місцевості завжди мають місто кілька головних напрямків вітру (Рис.3б), розташування Рис.4а і Рис.4б можуть стати ромбоєдричним для нормальним діагональних напрямків вітру, відповідно.

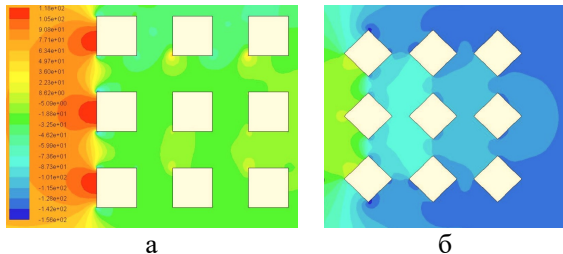


Рис.4. Контурні графіки розподілення тиску в потоці повітря при нормальному (а) і ромбоєдричному (б) розташуванні будинків.

Враховуючи різну вірогідність вітрів різних напрямків (Рис.3б), а також незвичних, статистично неочікуваних напрямків штормових вітрів, планування розташування будинків у нових мікрорайонах повинно проводитися з урахуванням майбутніх змін клімату і викликаних ними підсилення швидкості вітру в деяких напрямках. Попередні розрахунки на 3D моделях нових мікрорайонів дозволять

мінімізувати ризики пошкодження конструкцій, дерев, і шкоди здоров'ю і життю мешканців.

На Рис.5 наведені векторні графіки швидкості вітру, який обтікає будинки та простір між ними. Високий будинок, який знаходиться в перших рядах відносно напрямку вітру, приймає на себе головний силовий вплив, який для сильного шквального вітру може стати руйнівним для даху, а також вікон і балконів верхніх поверхів (Рис.5а). Розташування в перших рядах кількох будинків середньої поверховості приводить до більш рівномірного розподілення сили вітру на них і меншого силового впливу на найбільш високі будинки (Рис.5б). У просторі перед найвищим будинком утворюються потужні циркуляції вітру (вторинні течії повітря між будинками) на Рис.5а,б, які теж можуть мати негативний силовий вплив на рослини і людей.

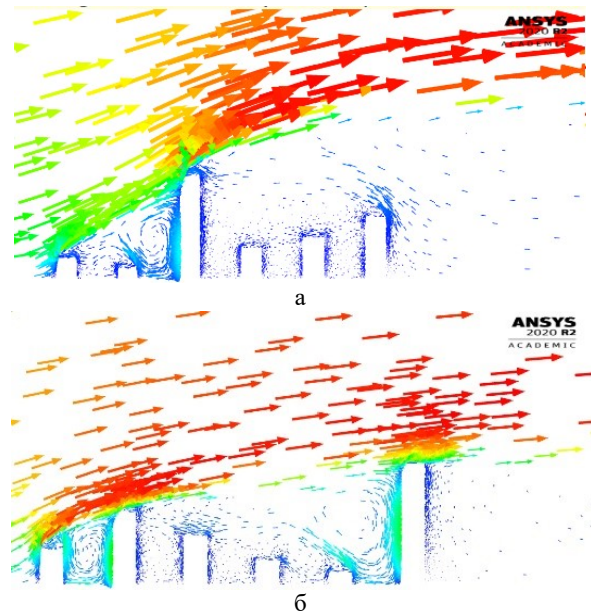


Рис.5. Векторні розподілення швидкості повітря при різних способах розташування найбільш високих будинків на території району.

Більш детально лінії току і вихрові зони між будинками наведені на Рис.6. Для випадку розташування (Рис.5а) перед найвищим будинком знаходиться велика зона відносно слабкої циркуляції (Рис.6а), в той час як для розташування (Рис.5б) перед другим будинком зліва утворюється невелика зона потужнішої циркуляції (Рис.6б). У першому випадку ця зона розповсюджуються на велику відстань і виконує функції підсилення вентиляції, особливо в жарку погоду, а в другому випадку локальна зона циркуляції при слабкому вітрі сприяє локальному накопиченню забруднень

у повітрі і ґрунті, а при сильному може стати небезпечною.

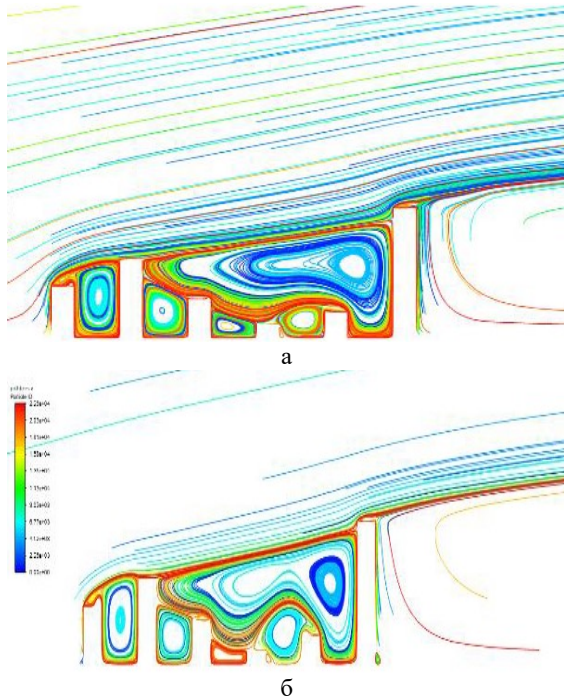


Рис.6. Графіки ліній току повітря для різних типів розташування будинків (як на Рис.5).

Другий цикл розрахунків проводився на тих самих геометріях для $v_x=10-20$ м/с в якості граничних умов, що відповідає штормовим вітрам. Оцінки показали, що відповідний силовий вплив при цьому зростає в 4.2-7.5 разів. За наявності в центрі мікрорайону торнадо з діаметрами (на рівні поверхні землі) $d=2-6$ м силовий вплив зростає ще на порядок за рахунок зсувних напружень і турбулентних коливань динамічного тиску. Для виявлення можливої руйнівної дії такого вітру на споруди і рослини потрібні дані про механічні властивості відповідних технічних і природних матеріалів.

4. Висновки.

Результати розрахунків показують, що для будь-яких способів розташування будинків

мікрорайону існує складна картина взаємодії потоків, які відбиваються від стін найвищих будинків, з відривними течіями між будинками та над дахами менш високих з них. Комп'ютерні симуляції дозволяють уникнути найбільш небезпечних способів розташування, при яких високі будинки розташовані нормально до напрямку домінуючих вітрів, а відстані між будинками занадто малі для забезпечення достатньої циркуляції повітря.

Небажаним слід вважати композиції 8-10 поверхових будинків з невисокою аркою між ними, оскільки вітер навіть середньої сили (6-9 м/с) викликає потоки значної сили, які запобігають руху людей і генерують підйомні сили, які викликають додаткові динамічні навантаження споруд. Подібні композиції повинні мати додаткові арки, як це прийнято для більш високих споруд (15 поверхів і вище) [4,5]. Оскільки у зв'язку з поступовим потепленням клімату і посиленням швидких хвиль тепла наявність і швидкість сильних, поривчатих і шквальних вітрів буде зростати, відповідні міри протидії повинні розроблюватися на основі чисельних розрахунків. Для нових мікрорайонів і будинків це можуть бути рішення відносно висоти і орієнтації будинків один до одного і до напрямку домінуючого і додаткових вітрів на даній місцевості. Для вже існуючих мікрорайонів відповідні рішення можуть включати густі рослинні насадження, дахи спеціальної форми, щити та інші конструкційні можливості.

Результати роботи були докладені на VI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми механіки» (Київ, 30–31 серпня 2021 р.). Автори щиро вдячні організаторам і учасникам конференції за увагу до роботи і стимулююче обговорення результатів.

Список використаних джерел

1. John A. How to incorporate climate change into modelling environmental water outcomes: a review / A. John, R. Nathan, A. Horne et al. // *J. Water&Climate Change*. – 2020. – Vol.11. – P. 327–340.
2. Кізілова Н.М., Ричак Н.Л. Інформаційне супроводження системи менеджменту водними ресурсами на урбанізованих територіях / Н.М. Кізілова, Н.Л. Ричак // Системи обробки

References

1. JOHN A., NATHAN R., HORNE A., et al. (2020) How to incorporate climate change into modelling environmental water outcomes: a review. *J. Water&Climate Change*. Vol.11. p. 327–340.
2. KIZILOVA N., RYCHAK N. (2020) Informatsiyne suprovodzhennya systemy menedzhmentu vodnymy resursamy na urbanizovanyh terytoriyah. *Systemy obrobky*

інформації. – 2020. – №4(163). – С.37-47.

3. Кізілова Н.М., Ричак Н.Л. Імовірнісні моделі менеджменту водними ресурсами на урбанізованих територіях. / Н.М. Кізілова, Н.Л. Ричак // Вісник КНУ імені Т.Г.Шевченка. Сер. «Фізико-математичні науки». – 2020. – №4. – С. 20-27.

4. Davenport A.G. A Statistical approach to the treatment of wind loading on tall masts and suspension bridges / A.G. Davenport. – University of Bristol, UK. - 1961.

5. Ciampoli M. Performance-based wind engineering: Towards a general procedure. / M. Ciampoli, F. Petrini, G. Augusti // Struct. Saf. - 2011. – Vol.33. – P. 367–378.

6. Ellingwood B. Fragility assessment of light-frame wood construction subjected to wind and earthquake hazards. / B. Ellingwood, D. Rosowsky, Y. Li, J. Kim // J. Struct. Eng. - 2004. – Vol.130. – P. 1921–1930.

7. Smith M.A., Caracoglia L. A Monte Carlo based method for the dynamic fragility analysis of tall buildings under turbulent wind loading / M.A. Smith, L.Caracoglia // Eng. Struct. - 2011. – Vol.33. – P. 410–420.

8. Fernandez-Caban P.L. Cyber-physical design and optimization of tall building dynamics using aeroelastic wind tunnel modeling. / P.L. Fernandez-Caban, M.L. Whiteman, B.M. Phillips et al. // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2020. – Vol.198. – P. 104092.

9. Spence S.M. Performance-based design and optimization of uncertain wind-excited dynamic building systems. / S.M. Spence, A. Kareem // Eng. Struct. - 2014. – Vol.78. – P. 133–144.

10. Cui W. A fully-coupled generalized model for multi-directional wind loads on tall buildings: A development of the quasi-steady theory / W. Cui, L. Caracoglia // J. Fluids&Struct. – 2018. – Vol.78 – P. 52–68.

11. Chuang W. A performance-based design framework for the integrated collapse and non-collapse assessment of wind excited buildings. / W. Chuang, S.A. Spence // Eng. Struct. - 2017. – Vol. 150. – P. 746–758.

12. Ричак Н.Л. Математичний аналіз забруднення повітря на території України з використанням даних з відкритих джерел. / Н.Л. Ричак, Н.М. Кізілова, В.А. Майструк, О.С. Макаренко, О.С. Прогнімак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2021.- №4(157).- С. 20-31.

13. Kubilay A. Coupling of physical phenomena in urban microclimate: A model integrating air flow,

informatics. Vol. 163. p.37-47.

3. KIZILOVA N., RYCHAK N. (2020) Imovirnostni modeli menedzhmentu vodnymy resursamy na urbanizovanyh terytoriyah. *T.G.Shevchenko Kyiv National Univ. Visnyk, ser. Physics&Math.* N4. p. 20-27.

4. DAVENPORT A.G. (1961) *A Statistical approach to the treatment of wind loading on tall masts and suspension bridges.* University of Bristol, UK.

5. CIAMPOLI M., PETRINI F., AUGUSTI G. (2011) Performance-based wind engineering: Towards a general procedure. *Struct. Saf.* Vol.33. p. 367–378.

6. ELLINGWOOD B., ROSOWSKY D., LI Y., KIM J. (2004) Fragility assessment of light-frame wood construction subjected to wind and earthquake hazards. *J. Struct. Eng.* Vol.130. p. 1921–1930.

7. SMITH M.A., CARACOGLIA L. (2011) A Monte Carlo based method for the dynamic fragility analysis of tall buildings under turbulent wind loading. *Eng. Struct.* Vol.33. p. 410–420.

8. FERNANDEZ-CABAN P.L., WHITEMAN M.L., PHILLIPS B.M., et al. (2020) Cyber-physical design and optimization of tall building dynamics using aeroelastic wind tunnel modeling. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* Vol.198. 104092.

9. SPENCE S.M., KAREEM A. Performance-based design and optimization of uncertain wind-excited dynamic building systems. // *Eng. Struct.* - 2014. – Vol.78. – P. 133–144.

10. CUI W., CARACOGLIA L. A fully-coupled generalized model for multi-directional wind loads on tall buildings: A development of the quasi-steady theory. // *J. Fluids&Struct.* – 2018. – Vol.78 – P. 52–68.

11. CHUANG W., SPENCE S. A performance-based design framework for the integrated collapse and non-collapse assessment of wind excited buildings. // *Eng. Struct.* - 2017. – Vol. 150. – P. 746–758.

12. RYCHAK N., KIZILOVA N., MAJSTRUK V., MAKARENKO O., PROGNYMAK O. (2021) Matematychnyy analis zabrudnennya povitrya na terytorii Ukrainy z vykorystannyam danyh z vidkrytyh dzherel. *Visnyk Vinnytskogo politehnicznego instytutu.* 4(157). p. 20-31.

13. KUBILAY A., DEROME D., CARMELIET J. (2017) Coupling of physical phenomena in urban microclimate: A model integrating air flow, wind-driven rain, radiation and transport in building materials. *Urban Climate.* Vol. 24. p.398-418.

14. WANG H., HOU X., DENG Y. (2015) Numerical simulations of wind-driven rain on

- wind-driven rain, radiation and transport in building materials. / A. Kubilay, D. Deromeb, J. Carmeliet // *Urban Climate*. - 2017. - Vol. 24. - P.398-418.
14. Wang H., Hou X., Deng Y. Numerical simulations of wind-driven rain on building facades under various oblique winds based on Eulerian multiphase model / H. Wang, X. Hou, Y. Deng // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* - 2015. - Vol.142. - P. 82–92.
15. Yang L. Probabilistic modeling of wind pressure on low-rise buildings / L. Yang, K.R. Gurley, D.O. Prevatt // *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* - 2013. - Vol.114. - P. 18–26.
16. Hou F., Sarkar P.P. Aeroelastic model tests to study tall building vibration in boundary-layer and tornado winds. / F. Hou, P.P. Sarkar. // *Engin. Struct.* - 2020. - Vol. 207. - 110259.
17. Wang F. Coherent structures and wind force generation of square-section building model. / F. Wang, K.M. Lam, G.B. Zu, L. Cheng // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* - 2019. - Vol.188. - P. 175–193.
18. Xing F. Study on localised wind pressure development in gable roof buildings having different roof pitches with experiments, RANS and LES simulation models / F. Xing, D. Mohotti, K. Chauhan // *Building&Envir.* - 2018. - Vol.143. - P. 240–257.
19. Le T.-H., Caracoglia L. Modeling vortex-shedding effects for the stochastic response of tall buildings in non-synoptic winds / Le T.-H., Caracoglia L. // *J. Fluids&Struct.* - 2016. - Vol. 61. - P. 461–491.
20. Lia B. Evaluation of CFD Simulation using various turbulence models for wind pressure on buildings based on wind tunnel experiments / B. Lia, J. Liua, F. Luoa, X. Manc // *Procedia Engin.* - 2015. - Vol. 121. - P. 2209–2216.
21. Liu J., Niu J. CFD simulation of the wind environment around an isolated high-rise building / Liu J., Niu J. // *Building&Envir.* - 2016. - Vol. 96. - P. 91-106.
22. Mohottia D. A comparison of Reynolds averaging Navier-Stokes (RANS) turbulent models in predicting wind pressure on tall buildings / D. Mohottia, K. Wijesooriyaa, D. A. Dias-da-Costa // *J. Building Engin.* - 2019. - Vol. 21. - P. 1–17.
23. Zhang Y. An experimental study on wind loads acting on a high-rise building model induced by microburst-like winds / Zhang Y., Sarkar P., Hu H. // *J. Fluids&Struct.* - 2014. - Vol. 50. - P. 547–564.
- building facades under various oblique winds based on Eulerian multiphase model. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* Vol.142. p. 82–92.
15. YANG L., GURLEY K.R., PREVATT D.O. (2013) Probabilistic modeling of wind pressure on low-rise buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* Vol.114. p. 18–26.
16. HOU F., SARKAR P.P. (2020) Aeroelastic model tests to study tall building vibration in boundary-layer and tornado winds. *Engin. Struct.* Vol. 207. 110259.
17. WANG F., LAM K.M., ZU G.B., CHENG L. (2019) Coherent structures and wind force generation of square-section building model. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* Vol.188. p. 175–193.
18. XING F., MOHOTTI D., CHAUHAN K. (2018) Study on localised wind pressure development in gable roof buildings having different roof pitches with experiments, RANS and LES simulation models. *Building&Envir.* Vol.143. p. 240–257.
19. LE T.-H., CARACOGLIA L. (2016) Modeling vortex-shedding effects for the stochastic response of tall buildings in non-synoptic winds. *J. Fluids&Struct.* Vol. 61. p. 461–491.
20. LIA B., LIUA J., LUOA F., MANC X. (2015) Evaluation of CFD Simulation using various turbulence models for wind pressure on buildings based on wind tunnel experiments. *Procedia Engin.* Vol. 121. p. 2209–2216.
21. LIU J., NIU J. (2016) CFD simulation of the wind environment around an isolated high-rise building. *Building&Envir.* Vol. 96. p. 91-106.
22. MOHOTTIA D., WIJESOORIYAA K., DIAS-DA-COSTA D. (2019) A comparison of Reynolds averaging Navier-Stokes (RANS) turbulent models in predicting wind pressure on tall buildings. *J. Building Engin.* Vol. 21. p. 1–17.
23. ZHANG Y., SARKAR P., HU H. (2014) An experimental study on wind loads acting on a high-rise building model induced by microburst-like winds. *J. Fluids&Struct.* Vol. 50. p. 547–564.

Надійшла до редколегії 29.10.2021 р.