

відповідних показників, що характеризують параметри формування, математичної моделі на основі коефіцієнтів кореляції, загальнокорпоративної стратегії чи бенчмаркінгу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Баранов А.І. *Методичні засади формування політики управління оборотними активами підприємств будівельної галузі [Електронний ресурс] / А.І.Баранов // Ефективна економіка. — 2015. — № 1. — Режим доступу до журналу: <http://www.economy.nauka.com.ua>.*

2. Грабовський І.С. *Вплив стану та ефективності управління обіговими коштами підприємства на його фінансову стійкість / І.С. Грабовський, А.І. Баранов // Економічний простір: збірник наукових праць. — Дніпропетровськ, — 2013. — №79. — С. 198-212.*

3. Грабовський І.С. *Методичні аспекти визначення ефективності управління обіговими коштами підприємства на основі показників обіговості / І.С. Грабовський, А.І. Баранов // Кримський економічний вісник. Науковий журнал. — 2013 — №5 (06). — С.99-103.*

#### АННОТАЦІЯ

В работе рассмотрены вопросы процесса управления формированием оборотных активов предприятий строительной отрасли и предложен алгоритм определения их величины, который предусматривает учет комплекса критериев их формирования.

Ключевые слова: оборотные активы, оборачиваемость оборотных активов, строительная отрасль, финансовая устойчивость, производительность оборотных активов.

#### ANNOTATION

The questions of process of management forming of circulating assets of enterprises of a build industry are in-process considered and the algorithm of determination of their size is offered, which foresees the account of complex of criteria of their forming

Keywords: current assets, turnover of current assets, the construction industry, financial stability, productivity of current assets.

#### УДК 532.5:519.6

*Н.О. Махінько, к.т.н.,  
НТУ ім. Ю.Кондратюка, Полтава*

### ПИТАННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВИХ ВПЛИВІВ НА ВИСОТНІ СПОРУДИ

#### АНОТАЦІЯ

В статті розглянуто основні аспекти комп'ютерного моделювання повітряного потоку з урахуванням специфіки будівельної аеродинаміки.

Ключові слова: вітрові впливи, висотні споруди, CFD-аналіз, моделі турбулентності, число Рейнольдса.

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день з'являється все більше робіт присвячених застосуванню чисельного CDF-моделювання для якісного та кількісного прогнозування інтенсивності вітрових впливів на будівельні конструкції. Проте їх практичне застосування для реального наукового пошуку та проектування викликає сумніви у спеціалістів у галузі windengineering. Передусім це стосується численних параметрів суб'єктивного характеру, які можуть вільно та помилково бути призначені користувачами програмних комплексів.

**Аналіз останніх досліджень.** База теоретичних досліджень в аеродинаміці будівельних споруд та основні напрямки її розвитку сформульовані у фундаментальних роботах [1–5]. Проте в самому процесі чисельного моделювання вітрових впливів для будівельних споруд присутній фактор неоднозначності. Певним кроком вперед можна розцінювати розробку методичних рекомендацій [6, 7], хоча ці документи орієнтовані на потреби екології та пішохідного комфорту, та не в повній мірі враховують специфіку будівельної аеродинаміки.

**Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Методи CDF-аналізу набувають поширення для вирішення широкого кола прикладних задач. В першу чергу це стосується проблем авіації та машинобудування. Проте розрахунок вітрових впливів для будівельних конструкцій загалом, і зокрема для висотних будівель, має достатньо багато нюансів та відмінностей від тих задач аерогідродинаміки, які вона з успіхом розв'язує в інших галузях науки. Моделі турбулентності, параметри розв'язання, критерії збіж-

ності, принципи побудови розрахункових моделей та топологія кінцево-елементних сіток, що найбільш ефективні, наприклад, для потреб авіабудування, є неоптимальними при аналізі аеродинамічних особливостей поганообтікаємих споруд, які характеризуються зовсім іншим рівнем турбулентності та наявністю розвинутих відривних течій.

**Формулювання цілей статті.** В рамках роботи постає задача вибору параметрів та постановки алгоритму дослідження програмного розрахунку при чисельному моделюванні вітрових впливів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для знаходження характеристик потоків, при розгляді задач газової динаміки, використовуються різні математичні моделі, які ґрунтуються на системі рівнянь Нав'є-Стокса. Засобом для вирішення таких математичних задач стали чисельні методи, застосування котрих значно розширило рамки досліджень — з'явилась можливість моделювання поведінки рідини чи газу в різних умовах, навіть таких, що не можуть бути відтворені за реальних обставин. Для реалізації цих перспектив створювалися програмні алгоритми, які з часом використовувались при комп'ютерному обчисленні. Проте складність апарату обчислень призводила до того, що кількість користувачів обмежувалась вузьким колом спеціалістів, які безпосередньо займалися обчислювальною газовою динамікою.

Певна річ, що наступним кроком розвитку чисельного моделювання динаміки рідин та газів, стало створення спеціалізованих програмних пакетів (CDF-пакетів чи комплексів), орієнтованих на більш широку аудиторію користувачів. В такому вигляді математичний апарат, покладений в основу чисельних методів, став дійсно універсальним, а з урахуванням стрімкого розвитку обчислювальної техніки й потужним засобом у проведенні чисельних розрахунків із газової динаміки.

Обчислювальні CDF-пакети та комплекси для потреб газової динаміки характеризуються за рівнем складності задач, які вони вирішують (максимальна кількість вузлів розрахункової сітки, ступінь врахування нелінійності та ін.) і за кількістю моделей поведінки рідини та газів. Серед них можна виділити наступні три класи. Професійні — комплекси високого класу, які підходять як для наукових, так і для інженерних розрахунків й здатні розв'язувати складні задачі із урахуванням великої кількості різноманітних ефектів та використанням широкого набору математичних

підходів. До них відносяться світові лідери серед комерційних пакетів — AnsysCFX, Star-CD, Fluent, Numeca. Комплекси середнього класу призначені, головним чином, для розрахунків інженерного рівня складності. Набір моделей та методів в них є достатньо широким, проте кількість опцій, за допомогою яких користувач може впливати на підготовку вихідних даних комп'ютерної моделі є обмеженим. До цього класу можна віднести пакети COSMOS FlowSimulation, STAR-CCM+, Ansys Flotran, FlowVision. Приватні комплекси застосовують алгоритми невисокої точності, або мають вузьку направленість розрахунку, наприклад, створені під деяку проблематику. Їх існує доволі багато, наприклад російські розробки VP2/3 та SINE.

Вирішення задачі знаходження впливу вітрового потоку на будівельні конструкції загалом та висотні споруди зокрема, зводиться до розв'язання тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса та рівняння збереження маси (нерозривності):

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} + u \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\partial p}{\partial \Lambda} + v_a \cdot \left[ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_a \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_a \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_a \cdot w)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

де  $\psi \equiv u \vee v \vee w$  ідентифікатор турбулентності за відповідним напрямом;

$\Lambda = x \vee y \vee z$  ідентифікатор напрямку за ортогональними осями;  $\rho_a$  та  $v_a$  щільність та кінематична в'язкість повітря;  $p = \rho_a \cdot R \cdot T$  тиск повітря у заданій точці при температурі  $T$ ;  $R$  універсальна газова стала.

Нестационарні рівняння Нав'є-Стокса утворюють змішану систему гіперболічно-параболічних рівнянь, розв'язання якої може бути отримане тим чи іншим маршовим методом, який лежить в основі більшості числових алгоритмів для цих рівнянь. Проте точний розв'язок, без використання певних спрощень, при сучасних можливостях комп'ютерної техніки, практично реалізується лише для дуже малих швидкостей потоку і завдань виключно теоретичного значення. Для задач будівельної аеродинаміки, в яких фігурують числа Рейнольдса більше ніж  $10^7$ , пряме чисельне розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса потребує надзвичайно потужних ресурсів обчислювальної техніки,

наразі недоступних. У зв'язку з цим в задачах CDF-аналізу набули широкого розповсюдження різні спрощуючі процедури, відомі як моделі турбулентності. Серед багатьох моделей турбулентності виділимо наступні п'ять, що можуть мати місце в будівельній аеродинаміці — Reynolds Averaged Navies-Stokes Model (RANS) — модель осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса; Reynolds Stress Model (RSM) — модель напружень Рейнольдса; Large Eddy Simulation (LES) — модель крупних вихрів; Detached Eddy Simulation (DES) — модель відокремлених вихрів; Scale Adaptive Simulation Detached Eddy Simulation (SASDES) — модель адаптивного масштабу відокремлених вихрів. Кожен з наведених типів турбулентності містить окремі підтипи, пов'язані з іменами вчених, що займалися їх розробкою.

Найбільш універсальною моделлю придатною для задач будівельної аеродинаміки є модель SST (сімейство RANS), яку запропонував F. Menter [4, 8]. Вона була отримана на основі поєднання двох моделей турбулентності, що описували зсувні течії на відділенні від стінки тіла та у пристіночних потоках із додаванням спеціальної функції, що відповідала за перемикання з однієї моделі турбулентності на іншу. Результуюча модель показала ефективне функціонування для широкого класу складних градієнтних потоків та поєднала достатню точність результатів та стійкість процесів ітераційних рішень навіть при відносно грубих розрахункових сітках.

Перспективною моделлю, яка дозволяє відмовитися від застосування турбулентної в'язкості та врахувати при цьому анізотропію турбулентності, є модель RSM, у якій для змикання рівнянь Нав'є-Стокса використовуються рівняння переносу напружень Рейнольдса сумісно з рівнянням для швидкості дисипації турбулентних пульсацій. Проте на сьогоднішньому ступені розвитку моделі даного типу потребують подальшого і суттєвого уточнення для пристіночних потоків, а тому мало придатні для аеродинаміки висотних споруд.

Для моделювання крупних вихорів застосовується модель LES, а відокремлених вихорів — модель DES. В них використовуються спеціальні фільтри для виведення рівнянь на розв'язних масштабах. При застосуванні моделі DES підходи LES та RANS комбінуються, що робить можливим у багато разів зменшити трудомісткість, у порівнянні із класичною моделлю LES.

Вартою уваги є і модель SASDES, яка комбінує моделі DES та RANS в процесі ітерацій, гнучко змінюючи розмір турбулентних вихрів у пристіночних областях. Слід підкреслити, що моделі LES, DES та SASDES є принципово тривимірними нестационарними підходами і, в цьому сенсі, вони безумовно поступаються за економічністю традиційним стаціонарним рівнянням.

Окрім обґрунтованого вибору математичної основи при розв'язанні задач будівельної аеродинаміки, важливим етапом є створення комп'ютерної моделі висотної споруди, яке зводиться до виконання декількох послідовних кроків.

Крок I — вибір розрахункових змінних, що відповідають цілям даного розрахунку, можуть бути зіставлені з експериментом і найбільше впливають на кінцеві результати та характер збіжності. Критерії наступні — чутливість до порядку апроксимації та густоти сітки, застосування ефективних засобів постпроцесінга, моніторинг результатів в процесі розрахунку.

Крок II — вибір рівнянь апроксимації фізики потоку, що починається з вибору процедури розрахунку: стаціонарний або нестационарний. Для турбулентної атмосфери необхідний нестационарний розв'язок із застосуванням рівнянь Нав'є-Стокса.

Крок III — вибір геометричного поєднання деталей споруди та умов прилеглої забудови. На даному етапі обирається форма та розмір розрахункової області, як правило зона радіусом 100-150 м і висотою до 200 м. Далі виконується генерування кінцево-об'ємної сітки безпосередньо у розрахунковій області.

Крок IV — призначення розмірів розрахункової області у вертикальному, поперечному та поздовжньому напрямках, керуючись розмірами дослідної споруди та граничними умовами. Із досвіду випробувань в аеродинамічних трубах приймається, що споруда висотою  $H$  впливає майже до відстаней  $10H$ . Відповідно до тестових розрахунків Японського Інституту Архітектури [9], розмір розрахункової області по вертикалі для ізольованих споруд повинен складати мінімум  $5H$ . Розмір вздовж потоку ізольованої споруди повинен бути не менше ніж  $5H$ , при умові, що профіль вітрового потоку достеменно відомий, або ж слід призначати більшу відстань для можливості формування реального профілю. Відстань за спорудою рекомендується обирати не менше ніж  $20H$ . Приклад роз-

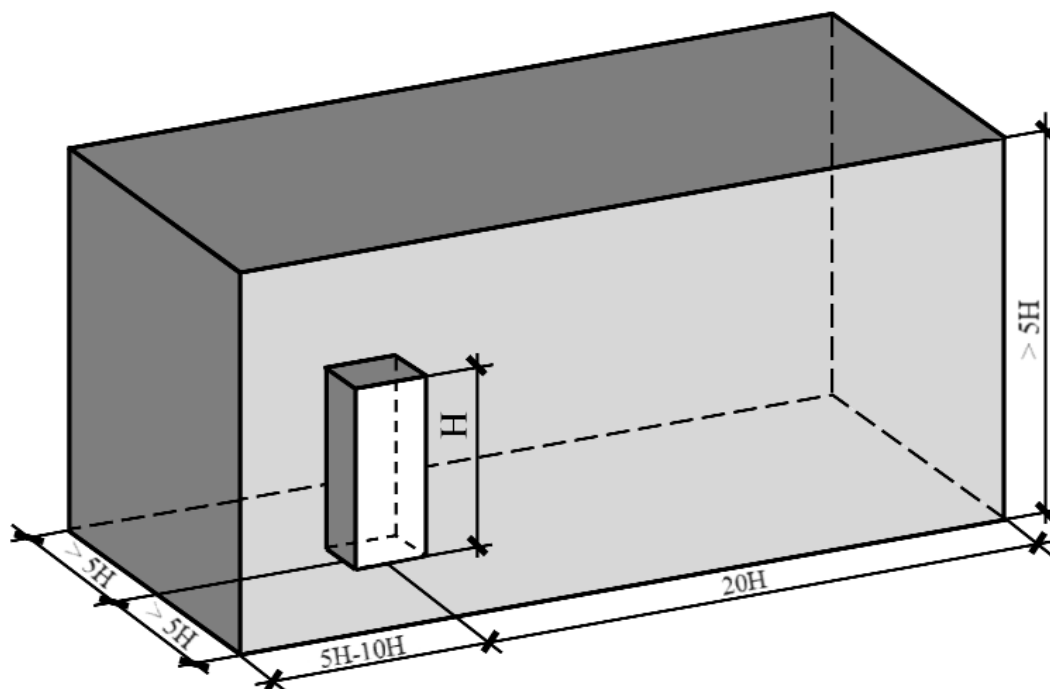


Рис. 1. До вибору розмірів розрахункової області при комп'ютерному моделюванні вітрових впливів

рахункової області комп'ютерних симуляцій наведений на рис. 1.

Крок V – вибір граничних та початкових умов. Вибір граничних умов дозволяє мінімізувати похибку, яка викликана обмеженням розрахункової області. Профіль середньої швидкості вітру на вході, як правило, отримують відповідно до настанов нормативних документів. Вносяться також, в разі наявності, дані замірів для турбулентної кінетичної енергії, напруження Рейнольдса, турбулентне розсіювання. Необхідно обов'язково контролювати, щоб заданий профіль основних характеристик (середнього вітру, інтенсивності турбулентності, масштабу турбулентності) не змінювався до центральної зони, де розташовується дослідна споруда. В якості тестового розрахунку для перевірки профілю рекомендується моделювання у розрахунковій області при відсутності споруди та однакової деталізації кінцево-об'ємної сітки й періодичних граничних умовах на бокових сторонах.

Для швидкостей вітру на стінках необхідно використовувати умову Дірихле повного прилипання для зсувних напружень. На гладких стінках доцільно моделювати в'язкий пограничний шар детально і зсувні напруження визначати за градієнтом локальних швидкостей по нормалі до стінки із вве-

денням демпферних функцій для зменшення впливу турбулентності, що викликана молекулярною в'язкістю. При цьому сітка поблизу поверхні повинна бути мілкою. Звичайну дрібність сітки характеризує безрозмірна відстань :

$$y^+ = y \cdot u_\tau / \nu_a \quad (3)$$

де  $y$  – відстань до першого вузла за нормаллю до стінки;  $u_\tau$  – осереднені зсувні напруження при швидкості поверхневого тертя  $u_\tau$ .

Так як дійсний розподіл напружень  $\tau_w$  невідомий поки не отримано числове рішення, то іноді доводиться перебудовувати сітку за результатами отриманої картини обтікання та коригувати значення  $y^+$ .

Крок VI – просторово-часова дискретизація. Для реалізації задач обчислювальної аеродинаміки на комп'ютері розроблена ціла низка різноманітних схем дискретизації у просторі та часі: метод дискретних вихрів, метод кінцевих об'ємів, метод кінцевих різниць, метод контрольних об'ємів і т.п. Найбільш ефективним на даний момент визнаний метод кінцевих об'ємів (МКО), який не вимагає настільки детального моделювання пограничного шару, як метод кінцевих елементів (МКЕ), та більш зручний при описі складних розрахункових

областей реальних споруд, ніж метод кінцевих різниць. Основна ідея МКО полягає в тому, що апроксимація рішення проводиться в межах не кінцевих елементів, а в межах деяких зон змінного розміру із гнучко змінною кількістю точок інтегрування. Для процедури дискретизації використовуються стандартні процедури розбивки на кінцеві елементи (тетраедри, піраміди або гексаедри), але після завантаження сітка інтерпретується іншим чином. Комірки взаємно стикуються своїми гранями. Існує багато різних типів сіток: структуровані, багатоблочні, неструктуровані та сітки із довільним спряженням. Рекомендації по вибору розміру сіток можуть бути різними. Вони залежать від прийнятої моделі турбулентності та геометричної форми тіла. Проте слід пам'ятати, що необхідна детальність сітки може бути верифікована тільки після аналізу результатів. Тому на сьогоденнішому етапі розвитку, методи CFD-аналізу (незалежно від моделі турбулентності) можуть застосовуватись лише для тих об'єктів, для яких існують розгорнуті результати досліджень в натурі або аеродинамічній трубі. Інакше просто неможливо виконати верифікацію задачі і, відповідно, підлаштувати параметри розрахункової сітки під задачу зовнішнього обтікання.

Крок VII – числова реалізація задач. При розв'язанні задач аеродинаміки в стаціонарній постановці розглядається сталий вітровий потік. Результатами розрахунку є середні значення швидкостей і тисків, осереднені кінетична енергія турбулентних пульсацій та енергія дисипації. Задача зводиться до вирішення рідкозаповненої системи лінійних алгебраїчних рівнянь із вузловими тисками, компонентами швидкостей та мірами локальної турбулентності в якості невідомих. Розв'язання проводиться по явній схемі. Хоча це і потребує дещо більших ресурсів, ніж почергове визначення невідомих, але задачі будівельної аеродинаміки збігаються набагато краще.

Перехід до нестационарного розрахунку виконується тільки після налагодження моделі в стаціонарній постановці та всебічного аналізу результатів. Це викликано тим, що час розрахунку відрізняється в десятки та сотні разів. Нестационарний розрахунок аеродинаміки споруд потребує знання поля швидкостей, змінного у часі, із заданим спектром пульсацій (Давенпорта, Соларі, Кармана і тп.), що відповідає заданій висоті та шорсткості поверхні.

В нестационарних задачах зовнішнього обтікання для апроксимації похідних у часі рекомендується застосовувати різниці схеми другого порядку точності. Для досягнення стійкого ітераційного процесу, крок у часі повинен призначатися із урахуванням критерію Куранта CFL (число Куранта-Фрідріхса-Леві) і повинен дозволяти відслідковувати принаймні десять точок для найбільшої частоти відгуку (наприклад, локального тиску, лобового опору споруди, бокової сили, аеродинамічного моменту). Іншим варіантом є призначення відповідного кроку дискретизації у часі:

$$\Delta t = CFL \cdot \delta_{\min} / U_{\max}, \quad (4)$$

де  $\delta_{\min}$  – мінімальний розмір ребра комірки сітки;  $U_{\max}$  – максимальна швидкість, яка може бути реалізована в області.

Час нестационарного розрахунку слід призначати таким чином, щоб це відповідало повному проходженню вітрового потоку через розрахункову область.

**Висновки.** Описані особливості вибору моделі турбулентного потоку при комп'ютерному моделюванні вітрового впливу на будівлю, та надані рекомендації щодо послідовності створення комп'ютерної моделі висотної споруди з обґрунтуванням процесів на кожному кроці.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Yeatts B.B. *Field experiments for building aerodynamics* /B.B. Yeatts, K.C. Mehta. – *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.- 1993. – Vol. 50. – P. 213-224.
2. Mendis P. *Wind Loading on Tall Buildings* /P. Mendis, T. Ngo, N. Haritos A. Hira, B. Samali, J. Cheung.- *EJSE Special Issue: Loading on Structures*.- 2007.- Vol. 3. – P. 41-54. – Режим доступу до журн.: <http://www.ejse.org>
3. Menter F.R. *Ten years of industrial experience with the SST turbulence model* /F.R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry. – *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 (CD-ROM Proceedings) Redding, CT: Begell House Inc.* -2003. -P. 625-632.
4. Menter F. R. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications* / F.R. Menter. – *AIAA Journal*. – 1994. – Vol. 32(8). – P. 1598- 1605.

5. Menter F.R. *Scale-Adaptive Simulation Model using Two-Equation Models* / F.R. Menter, Y.A. Egorov. — AIAA paper. — 2005. — P. 1093-1095.

6. Franke J. *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, quality assurance and improvement of microscale meteorological models* / J. Franke, F. Hellsten, H. Schlunzen, B. Carissimo. — Brussels/Belgium, 2007. — 52 p.

7. Franke J. *Recommendations on the use of CFD in wind engineering* / J. Franke // *Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode.* — Belgium, 2004. — 19 p.

8. Menter F.R. *Ten years of industrial experience with the SST turbulence model* / F.R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry // *Turbulence : Heat and Mass Transfer 4 : Proc. Intern. Conf. Begell House, Inc. 2003.* ? 8 p.

9. Tominaga Y. *Cross Comparisons of CFD Results of Wind Environment at Pedestrian Level around a high-rise Building and within a Building Complex* / Y. Tominaga, A. Mochida et al. // *J. of Asian Architecture and Building Engineering.* ? 2004. ? P. 63?70.

#### АННОТАЦІЯ

В статье рассмотрены основные аспекты компьютерного моделирования воздушного потока с учетом специфики строительной аэродинамики.

Ключевые слова: ветровые воздействия, высотные сооружения, CFD-анализ, модели турбулентности, число Рейнольдса.

#### ANNOTATION

This article discusses basic principles of computer modeling of air flow with specificity of construction aerodynamics.

Keywords: wind exposure, high-rise buildings, CFD-analys, turbulence model, the Reynolds number.

#### УДК 624.012

*Д.В. Сморгалов, асистент;*

*Д.П. Обіход, студент; КНУБіА, Київ*

### ТЕХНОЛОГІЯ РОЗРАХУНКУ ПРОГІНІВ ДВОШАРОВИХ ПЛИТ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ЛІРА-САПР

#### АННОТАЦІЯ

Робота присвячена експериментально-теоретичним дослідженням плоских одно- і двошарових бетонних (армованих і неармованих) плит в комбінації із шаром сталевібробетону, які оперті по контуру під дією короточасного поперечного навантаження. Розроблено пропозиції щодо розрахунку прогинів плит на ПК ЛІРА-САПР.

Ключові слова: сталевібробетон, двошарові плити, міцність, тріщиностійкість, деформативність, прогин.

**Постановка проблеми.** Однією з першочергових задач будівельного комплексу в галузі бетону і залізобетону є розширення використання бетонів високої міцності, розробка нових конструктивних систем на основі довговічності споруд і створення гнучких технологій. Ефективним з точки зору нових форм є упровадження шаруватих конструкцій, а із матеріалів — фібробетонів. Для шаруватих конструкцій знайшли широку реалізацію у дорожньому і аеродромному будівництві, улаштуванні промислових підлог різного призначення, проїзних частин залізничних і автодорожніх мостів, у спорудах ТЕС і АЕС тощо. Як показує досвід, найбільш доцільним і ефективним є двошарові системи: нижній шар виконують із армованого бетону, верхній шар — із сталевібробетону.

Огляд і аналіз останніх наукових досліджень застосування прогресивних шаруватих плит, які працюють у двох напрямках, свідчить, що їх реалізація у будівлях і спорудах в значній мірі гальмується відсутністю проектної нормативної бази. Вивчення експлуатаційних властивостей взаємодії різних матеріалів, зокрема бетону і сталевібробетону, здається вельми актуальним. Нарешті, введення нещодавно проектних норм України [3], гармонізованих із Європейськими стандартами, для шаруватих плит вимагає ретельного дослідження їх експлуатаційних якостей. Тому проблему широкого упровадження шаруватих конструкцій у бу-