

**БУДІВНИЦТВО**

УДК 624.074.5

**О. І. Сіянов****ПАРАМЕТРИ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ  
ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ФЕРМ МЕТАЛЕВИХ  
ЦИЛІНДРИЧНИХ СІТЧАСТИХ ПОКРИТТІВ**

Вінницький національний технічний університет

*Знайдено параметри раціонального використання горизонтальних ферм металевих циліндричних сітчастих покриттів. Враховано зміну стріли підйому, виконання умов граничних станів і чутливість до втрати стійкості. Отримано характерні закономірності роботи уразливих ділянок покриттів. Наведено особливості критичного деформування підкріплених конструкцій за наслідками можливого перевищення розрахункового навантаження.*

**Ключові слова:** металеві циліндричні сітчасті покриття, підкріплення, моделювання, розрахунок, стійкість, силові фактори, параметри деформування, раціональне використання, горизонтальні ферми.

**Вступ**

Наукові джерела протягом останніх десятиліть свідчать про надзвичайно широку перспективу масового використання в будівництві металевих циліндричних сітчастих покриттів [1—6]. Їх унікальна просторова форма давно вже приваблює потенційних замовників. Однак такі конструкції внаслідок уразливості окремих ділянок сітчастої поверхні характеризуються встановленими обмеженнями габаритних розмірів [7]. Прагнення збільшити хоча б один параметр покриття призводить до необхідності застосовувати дієві конструктивні заходи [8—13]. Зрозуміло, що кожний з них передбачає надання відповідної згинальної та мембранної жорсткості. Можна звичайно підвищити ступінь заповнення сітки або збільшити площу поперечного перерізу стержнів. Проте раціональнішим вважається використання додаткових граней покриття у вигляді горизонтальних ферм з підвісками [14, 15], які сприяють безпосередньому розвантаженню конструкції та створюють простір для проведення інженерних комунікацій.

У попередній статті [15] комплексними дослідженнями встановлено, що найкращий ефект в роботі покриття досягається за рахунок використання опорних ферм, розташованих в горизонтальному напрямку назовні. Невідомі лише параметри за яких доцільно їх застосовувати. Очевидно, що головним чинником тут виступають співвідношення геометричних розмірів. Змінюючи їх, можна визначити фактори розрахункових станів і перевірити систему на стійкість.

Поставлені задачі актуальні, адже їх вирішення та подальший аналіз результатів дозволять виявити межі раціонального використання горизонтальних ферм в опорних ділянках металевих циліндричних сітчастих покриттів.

Структура проведеної роботи передбачала вибір топології поверхні, встановлення вихідних і змінних параметрів, побудову комп'ютерних моделей, розрахунок та відбір даних для визначення прийнятних показників в межах забезпечення стійкості конструкції.

**Початкові положення**

З літературних джерел відомі ґрунтовні розробки деяких сітчастих поверхонь покриттів [11—13, 16—21]. Знайдена також інформація про те, що кожна сітка має притаманні тільки їй властивості та працює по-різному [19, 21—22].

Порівняння особливостей роботи наявних сітчастих поверхонь вказує на доцільність вибору схеми з поздовжніми і поперечними ребрами та низхідними розкосами, оскільки саме вона забезпечує максимальну економічність прийнятого рішення. Тому така схема в статті безпосередньо і вибрана як базова.

Ширина  $B$  сітки або відстань між опорними вузлами за напрямком дуги є функцією радіуса  $R$  і кута  $\alpha$  описаного кола покриття:

$$B = \Phi(R, \alpha). \quad (1)$$

Але оскільки горизонтальні ферми впливають в основному на роботу опорних ділянок стрижневої конструкції, зафіксовано ширину  $B$  і довжину  $L$  покриття зі зміною решти геометричних параметрів. Тут слід зазначити, що частіше під час формоутворення циліндричних сітчастих поверхонь для металевих покриттів за відповідний параметр пропонують вибрати ширину  $B$ , причому на рівні не більшому ніж 21 м [7]. Безумовно зазначена величина продиктована економічними і конструктивними міркуваннями та не передбачає наявності підкріплювальних елементів. Хоча є вже досить прийнятні результати розрахунків покриття за межею указаної величини. Зокрема, лінійний розмір  $B$  останнім часом беруть більший і приймають таким, що дорівнює 24 м. А згідно з дослідженнями геометричних параметрів в залежності від жорсткості конструкції [23], довжина покриття безпосередньо пов'язана з шириною і знайдена у заздалегідь визначених рамках  $L = (1, 2 \dots 1, 4) B$ . Аналогічно ширина  $B$  конструкції є величиною залежною, яка в 3—5 разів перевищує стрілу підйому  $f$ .

Відповідно до сучасних тенденцій формоутворення і вказаних співвідношень геометричних параметрів прийнято найдоцільніші габаритні розміри покриття в плані  $B \times L = 24 \times 30$  м, які безумовно відповідають зазначеним рамкам і становлять невелику різницю між собою, про що свідчить отриманий вираз  $L = 1,25 B$ .

Гранями уздовж ширини і панелями за напрямком довжини покриття забезпечено утворення прямокутних чарунок.

В опорних ділянках для підкріплення конструкції встановлені зовнішньо розташовані горизонтальні ферми розміром  $2,2 \times 30$  м, кожна з яких за допомогою арматурних підвісок жорстко приєднана до граней покриття. Оскільки опорні ферми одним поясом поєднані з конструкцією, то їх сітка відповідала граням, розташованим на поверхні.

Для виготовлення основних і додаткових елементів вибрано сталь класу С235 ( $R_y = 230$  МПа) марки ВСт3пс. Несучим елементам надано тонкостінний безшовний трубчастий профіль.

Обпирання вузлових з'єднань вирішено здійснити в шарнірному варіанті, причому з таким розрахунком, щоб забезпечити геометричну незмінність просторової конструкції [15].

Власна вага визначена в залежності від зміни структури сітчастої поверхні на підставі призначених параметрів жорсткості елементів із наявного програмного сортаменту. Снігове і вітрове навантаження розраховано для умов міської забудови за чинними нині будівельними нормами [24] та прикладене до конструкції у вигляді зосереджених вузлових сил.

### Формоутворення сітчастої поверхні в межах забезпечення її стійкості

Розглянуті у такий спосіб початкові положення покладені в основу формоутворення покриття.

Використовуючи метод обертання поверхонь [25] виконано побудову необхідних скінченно-елементних моделей.

На рис. 1 показано послідовність формоутворення покриття за допомогою програмних засобів SCAD.



Рис. 1. Етапи моделювання покриття

В процесі створення моделей і подальших розрахунків проаналізовано вплив густини розташування елементів у межах забезпечення стійкості конструкції, на підставі чого виконано оцінку можливих ступенів заповнення сітчастої поверхні за наявності раціонального підкріплення покриття горизонтальними фермами. За результатами аналізу визначено безцільність згущення сітки зайвими чарунками, тим більше за наявності введення додаткових елементів. Як наслідок, розрі-

дження поверхні прийнято на підставі тестових прикладів, а зміну висоти покриття проконтрольовано перевіркою його стійкості за умовою [17, 18, 20, 21]

$$\dot{a}^2/Ri = \dot{a}^2 8f / (B^2 + 4f^2) i < 9, \quad (2)$$

де  $a$  — розмір прямокутної чарунки, спрямований за напрямком твірної;  $i$  — радіус інерції поперечного перерізу стержня.

Чутливість сітчастої поверхні визначена шляхом зміни кута  $\alpha$  описаного кола покриття, радіуса кривизни  $R$  і стріли підйому  $f$  та відображена кількістю  $n$  півхвиль за напрямком дуги і коефіцієнтом  $\lambda$  запасу стійкості

$$n = [2, 4]; \lambda \in [0, \Lambda]. \quad (3)$$

де  $\Lambda$  — задане величина, яку здатний досягти параметр  $\lambda$ .

Уздовж дуги  $i$  за напрямком твірної прийнято 12 чарунок (менша їх кількість не витримала перевірку стійкості, а більша — привела до невинуватих витрат матеріалів).

Таким чином визначено межі можливої кривизни ( $1/R = 0,059 \dots 0,076$ ) та вихідні показники геометрії покриття (табл.) шляхом пошуку доцільності застосування зазначеного способу підкріплення.

Отримане обмеження кута  $\alpha$  виявлено з умови перевірки стійкості (2) і результатів визначення параметрів деформування. Зокрема, використання горизонтальних ферм в конструкції з мінімальною стрілою підйому ( $f = 4,97$ ) суттєво покращило роботу покриття, підвищивши жорсткість небезпечних ділянок більше ніж в 1,5 рази. Наступні дві моделі, а особливо третя, майже так само, але краще відреагували на введене підкріплення. Втім лише четверта схема ( $\alpha = 120^\circ$ ,  $R = 13,86$  і  $f = 6,93$  і) не зазнала суттєвих змін від додаткових граней покриття і показала порівняно слабке зменшення найбільших переміщень вузлів як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках. На завершення виконано перевірку стійкості п'ятої (останньої) моделі покриття, за результатами якої зроблено висновок про необхідність подовження радіуса інерції  $i$  поперечного перерізу стержнів. Причому максимальні вузлові відхилення в характерних місцях такої моделі від введення горизонтальних ферм скорочені істотно та з відчутною різницею у двох головних напрямках ( $x, z$ ).

На відміну від попередніх досліджень [1, 11, 21, 23] та зважаючи на різні конструктивні рішення і підходи в розрахунках, виявлено раціональність використання покриттів з кривизною  $1/R = 0,068 \dots 0,076$  з початковим значенням кута  $\alpha = 110^\circ$ . І якщо за відсутності підкріплення запропоновано піднімати кут  $\alpha$  від  $120^\circ$  до  $150^\circ$ , то у випадку наявності горизонтальних ферм, розташованих назовні, достатньо обмежити кут  $\alpha$ , залишивши його на рівні  $130^\circ$ .

Підставою для встановлення раціональних параметрів стало порівняння небезпечних переміщень вузлів, зафіксованих в моделях покриття. Зокрема максимальні числові значення від першої до третьої моделі знайдено за напрямком вертикалі. Натомість четверта і п'ята моделі показали найбільші вузлові переміщення у напрямку ширини.

Із наведених на рис. 2 графіків видно, що всі моделі позитивно відреагували на включення в роботу двох горизонтальних ферм. Зафіксовано майже лінійну закономірність зміни небезпечних вузлових відхилень при різних геометричних параметрах. За умови поступового підйому покриття найбільші переміщення вузлів по вертикалі мали тенденцію до зменшення, а по горизонталі уздовж ширини конструкції відчутних змін не зазнали.

Параметри підкріплених скінчено-елементних моделей покриття

Номер моделі	$\alpha$ , град.	R, м	$f$ , м
1	90	16,97	4,97
2	100	15,66	5,6
3	110	14,65	6,25
4	120	13,86	6,93
5	130	13,24	7,64

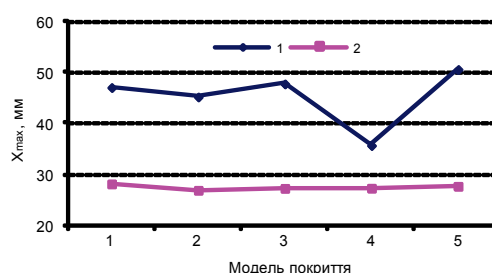
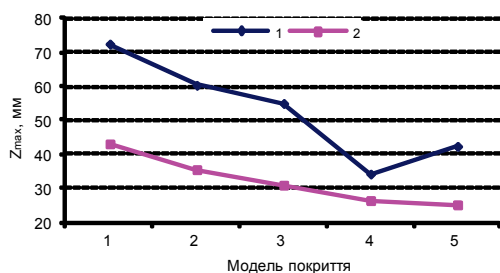


Рис. 2. Динаміка зміни максимальних переміщень вузлів моделей покриття:  
1 — невідкріпленого; 2 — з горизонтальними фермами

Запропоноване підкріплення забезпечило досить рівномірний характер зміни максимальних переміщень вузлів в межах розглянутих моделей. Як наслідок, досягнуто підвищення жорсткості і зменшення чутливості сітчастих поверхонь.

Безумовно, відмічені показники деформування стали результатом роботи елементів покриття в рамках зміни геометричних параметрів. Зафіксовано досить позитивний вплив додаткових граней на розподіл зусиль по поверхні. Особливо показовим можна вважати той факт, що в кожній моделі скорочено розрив між параметрами максимально розтягнутих і максимально стиснутих стержнів. Більшість моделей виявило перевищення найбільших зусиль розтягу над найбільшими зусиллями стиску. Виняток склала четверта модель, в якій максимальне значення поздовжньої сили з деяким перевищенням над найбільшим зусиллям розтягу отримав стиснутий стержень.

Взагалі оцінюючи розподіл зусиль по поверхні за наслідками введення горизонтальних ферм, слід зазначити, що характерна зміна знаку з розтягу «+» на стиск «-» зафіксована в слабо навантажених стержнях верхнього ребра опорних граней. В п'ятій моделі на таку зміну не відреагували лише два стержня, які рівновіддалені від торців. В розкосах нижніх граней на тій самій відстані від крайніх дуг опорні ферми привели до аналогічної зміни зусиль. Перші три моделі, крім того, виявили на обох схилах також стиск в розкосах наступної грані покриття. Отримані результати в цілому забезпечили прийнятний розподіл зусиль по поверхні.

Виконані перевірки несучої здатності моделей показали відповідність виконанню умов граничних станів.

Між тим зміна вказаних параметрів дещо вплинула на розміри чарунок, що привело до використання різних величин навантажень і, як наслідок, до істотної (на 54,9 %) зміни значення коефіцієнта запасу  $\lambda$ .

Форма можливого настання критичного стану конструкції у випадку наявності опорних ферм для перших чотирьох зазначених моделей виявила три півхвилі ( $n = 3$ ) уздовж дуги і одну півхвилю ( $m = 1$ ) за напрямком твірної. Проте стійкіший характер показала п'ята модель, стріла підйому якої забезпечила підвищення жорсткості покриття, що привело до зростання кількості півхвиль ( $n = 4$ ) уздовж ширини.

На рис. 3 показано результат деформування одного з покриттів за наслідками можливого перевищення розрахункового навантаження.

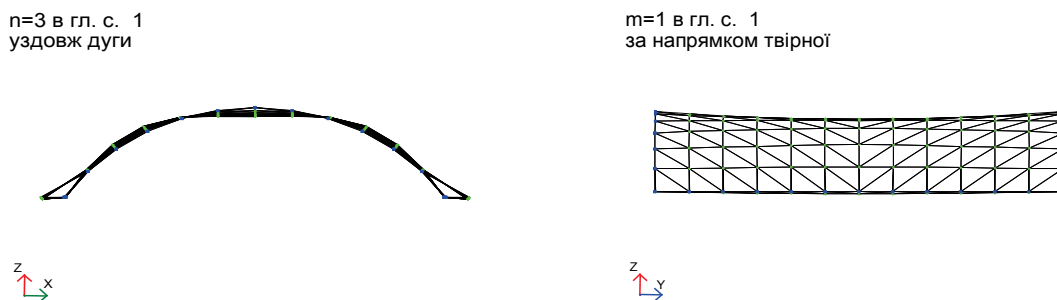


Рис. 3. Приклад зміни геометрії підкріпленої скінчено-елементної моделі покриття з параметрами  $\alpha = 110^\circ$ ,  $R = 14,65$  і  $f = 6,25$  і уздовж дуги і за напрямком твірної

Тепер зрозуміло яких змін можуть набувати покриття з горизонтальними фермами за умови можливого настання критичного стану. Водночас, варто зазначити, що за результатами розрахунків отримано три конфігурації викривлення сітчастих поверхонь. З них перша проілюстрована прогинами в опорних ділянках, друга виділена небезпечними вертикальними переміщеннями в області гребеня, а третя відображена одночасними деформаціями у верхній і нижніх частинах конструкції (рис. 4).

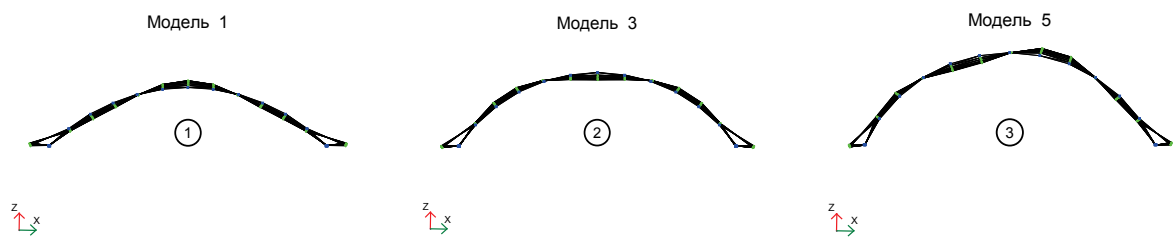


Рис. 4. Конфігурації викривлення форми трьох підкріплених моделей покриття

Для моделей 2 і 4 форми зміни поверхонь ідентичні формам відповідних моделей 1 і 3. В геометричному відношенні такі схеми мають лише різні кути  $\alpha$  описаного кола покриття, радіуси кривизни  $R$  і стріли підйому  $f$ . Модель 5 показала зовсім інший обрис зміни дуги з високим потенціалом початкової будови. Подальший підйом або зменшення висоти покриття не раціональні, оскільки перше відчутно послабило вплив горизонтальних ферм, а друге призвело до надто великих вузлових переміщень.

### Висновки

1. Шляхом скінченно-елементного моделювання, розрахунку і аналізу металевих циліндричних сітчастих покриттів знайдено параметри раціонального використання горизонтальних ферм.
2. Виконано оцінку наявних тенденцій формоутворення конструкції в межах забезпечення її стійкості. Обґрунтовано вибір топології поверхні, прийнято рекомендовані співвідношення габаритних розмірів  $L/B = 1,25$ ,  $B = 3 \dots 5f$  і сформовано відповідні розрахункові моделі.
3. Наведено критерії визначення чутливості сітки від застосування додаткових граней покриття. Враховано обов'язкове виконання умов граничних станів і чутливість до втрати стійкості.
4. Отримано межі прийнятної кривизни  $1/R = 0,068 \dots 0,076$  і набір основних геометричних параметрів  $\alpha$ ,  $R$ ,  $f$  для створення підкріплених конструкцій. Розглянуто випадок зовнішнього розташування опорних граней.
5. Проаналізовано вплив підвищення жорсткості і збільшення стріли підйому на показники роботи сітчастої поверхні. Виявлено характерні закономірності зміни вузлових відхилень і внутрішніх силових факторів уразливих ділянок покриття. Зафіксовано незначну різницю між величинами переміщень вузлів в небезпечних напрямках у просторі та зміну знаку зусиль з розтягу на стиск в недостатньо навантажених стержнях. Досягнуто найповніше використання міцності матеріалу.
6. Зазначено результати викривлення форми моделей покриття за наслідками підкріплення і можливого перевищення розрахункового навантаження. Висвітлено слабкі місця та особливості критичного деформування системи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Свердлов В. Д. Металеві циліндричні стержневі покриття : моногр. / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 134 с.
2. Свердлов В. Д. Одношарові циліндричні стержневі покриття (перспективи, проблеми, шляхи вирішення) / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов // Індивідуальний житловий будинок : праці респуб. наук.-техн. конф., (Вінниця, 25—27 верес. 2001 р.). — Вінниця. — 2001. — С. 10—14.
3. Королев В. П. EUROCORR 2008 / В. П. Королев // Промислове будівництво та інженерні споруди. — 2009. — № 1. — С. 44—46.
4. Сіянов О. І. Доцільність застосування металевих циліндричних стержневих покриттів в конкретних об'єктах будівництва / О. І. Сіянов // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : зб. наук. праць. — Вінниця : «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2004. — С. 114—116.
5. Алпатов В. Ю. Определение рациональной геометрии структурного покрытия зерносклада, выполненного в виде двухсетчатой оболочки / В. Ю. Алпатов, И. С. Холопов : сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте». — Самара. — 2002. — С. 193—198.
6. Свердлов В. Д. Напряжки удосконалення металевих циліндричних стержневих покриттів / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов : сборник докладов VIII Украинской науч.-техн. конф. «Металлические конструкции : взгляд в прошлое и будущее», (Киев, 18—22 октяб. 2004 г.). — Киев : Сталь, 2004. — Ч. 2. — С. 18—20.
7. Свердлов В. Д. Совершенствование цилиндрических стержневых систем покрытий / В. Д. Свердлов, А. И. Сіянов // Теория и практика металлических конструкций : тр. Междунар. конф., (Донецк-Макеевка, 2—4 декаб. 1997 г.). — Донецк-Макеевка, 1997. — Т. 2. — С. 37—41.
8. Сіянов О. І. Аналіз конструктивних рішень металевих одношарових циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. — Рівне : НУВГП, 2004. — Вип. 11. — С. 279—282.

9. Сіянов О. І. Робота металевого одношарового циліндричного стержневого покриття з жорсткими підкріплюючими елементами / О. І. Сіянов // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : зб. наук. праць. — Вінниця : «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2009. — № 2 (7). — С. 13—27.
10. Сіянов О. І. Дослідження схем розташування хрестоподібних в'язей одношарового циліндричного стержневого покриття / О. І. Сіянов // Промислове будівництво та інженерні споруди. — 2012. — № 1. — С. 13—15.
11. Попов И. Г. Цилиндрические стержневые системы / И. Г. Попов. — Л.; М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. — 112 с.
12. Таиров В. Д. Сетчатые пространственные конструкции / В. Д. Таиров. — К. : Будівельник, 1966. — 73 с.
13. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции ; пер. с нем. / О. Патцельт. — М. : ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. — 95 с.
14. Сіянов О. І. Моделювання і розрахунок одношарового циліндричного стержневого покриття з горизонтальними фермами / О. І. Сіянов // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : збірник наук. праць. — Вінниця : «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2011. — № 2 (11). — С. 6—9.
15. Сіянов О. І. Вплив розташування опорних ферм на роботу металевих циліндричних сітчастих покриттів / О. І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2013. — № 1. — С. 27—30.
16. Цейтлин А. А. Сетчатые покрытия больших пролетов / А. А. Цейтлин. — К. : УкрНИИС, 1947. — 14 с.
17. Райт Д. Т. Большие сетчатые оболочки / Д. Т. Райт. — Л. : Стройиздат, 1966. — 11 с.
18. Лубо Л. Н. Руководство по проектированию и расчету покрытий нового типа — сетчатых оболочек / Л. Н. Лубо. — Л. : ЛенЗНИИЭП. 1971. — 63 с.
19. Рюле Г. Пространственные покрытия. Конструкции и методы возведения / Г. Рюле ; пер. с нем. — Том 2. — М. : Стройиздат, 1974. — 247 с.
20. Лебедев В. А. Сетчатые оболочки в гражданском строительстве на севере / В. А. Лебедев, Л. Н. Лубо. — Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. — 136 с.
21. Трущев А. Г. Пространственные металлические конструкции : учеб. пос. для вузов / А. Г. Трущев. — М. : Стройиздат, 1983. — 215 с.
22. Инженерные конструкции : [учеб. для вузов] / [В. Н. Голосов, В. В. Ермолов, Н. В. Лебедева и др.] ; под ред. В. В. Ермолова. — М. : Высш. школа, 1991. — 408 с.
23. Свердлов В. Д. Исследование пространственных цилиндрических стержневых систем покрытий : дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук 05.23.01 / Свердлов Владимир Деонисович. — К., 1977. — 174 с. — Библиогр.: С. 153—161.
24. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи / Мінбуд України. — К. : Сталь, 2006. — 60 с.
25. Вычислительный комплекс SCAD / [Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А. и др.]. — М. : изд-во «СКАД СОФТ», 2009. — 656 с.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Стаття надійшла до редакції 10.09.2013

**Сіянов Олександр Ілліч** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри промислового та цивільного будівництва. Вінницький національний технічний університет, Вінниця