

СПІВСТАВЛЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ВАРІАНТІВ ПОКРИТТЯ СКЛАДСЬКОЇ БУДІВЛІ

У зв'язку із постійним нарощуванням в усьому світі обсягів і темпів вантажних транспортних перевезень особливої актуальності набуває створення високоякісних складських будівель. На жаль, у вітчизняній практиці даному аспекту приділяється доволі мало уваги і, навіть, спеціалізовані стандарти з класифікації будівельних конструкцій практично обходять це питання стороною. Проте в міжнародній практиці складські будівлі є більш важливим будівельним об'єктом, який має спеціалізовану класифікацію за сукупністю основних показників. Причому, чим вище клас будівлі, тим вище його статусність та вагомість і відповідно тим вищий дохід він може приносити його власнику. Тому питання підвищення класу складської будівлі є доволі актуальним і значущим.

Одним із параметрів, який безпосередньо впливає на класність складської будівлі є відстань між колонами. В ході проведених досліджень було розглянуто три конструктивні варіанти покрівлі складської будівлі зі сталевим каркасом, розташованої в місті Дніпро. Варіанти відрізнялись конструкцією несучого ригеля і забезпечували можливість перекриття прольотів в 36 м, 24 м і 12 м при загальному прольоті складської площі в 72 м. В ході чисельного аналізу використовувався метод скінчених елементів з використанням вітчизняного проектно-обчислювального комплексу SCAD.

В результаті були встановлено, що конструктивний варіант із використанням кроквяних ферм прольотом 24 м є більш ефективним за масовими показниками, ніж варіанти використання кроквяних ферм прольотом 36 м (на 60 %) або балок прольотом 12 м (на 130 %). Це надало можливості підвищити клас розглядуваної складської будівлі за міжнародною класифікацією з класу В+ до класу А. Для обраного конструктивного варіанту були розроблені детальні креслення, які плануються до впровадження в проектну практику.

Ключові слова: складська будівля, сталева ферма, сталева балка, метод скінчених елементів, проектно-обчислювальний комплекс SCAD.

Постановка проблеми. Сучасні транспортні перевезення є однією з провідних галузей багатьох країн світу. Обсяги товарообігу постійно збільшуються, швидкість доставки товарів різного призначення постійно підвищується, а дальність транспортування постійно зростає [1-5]. При цьому домінуюча роль в структурі транспортних перевезень належить залізничному транспорту, а друге місце займає автомобільний транспорт [6] – рис. 1.



Рис. 1. Структура транспортних перевезень України

Окремим питанням, пов'язаним із безперервною та тривалою роботою всього транспортного комплексу є необхідність влаштування складського комплексу, який здатний компенсувати нерівномірність доставки товарів до місця споживання. При цьому постають не тільки питання грамотного та кваліфікованого керування такими комплексами на основі сучасних уявлень про логістичні системи [7, 8], а й питання створення самих складських будівель, їх оснащення та експлуатації. В свою чергу будівництво складських будівель нерідко потребує вибору найбільш ефективного конструктивного варіанту, націленого не тільки на мінімізацію маси й відповідно вартості всієї конструкції, підвищення технологічності її виготовлення, а й на покращення функціональності роботи самої будівлі. Тому сучасні складські будівлі виявляються доволі складними інженерними конструкціями, які мають різні різновиди та відрізняються за сукупністю показників у вітчизняній класифікаційній системі [9-11] – рис. 2.



Рис. 2. Класифікаційні ознаки сучасних складських будівель

В міжнародній практиці прийнята дещо інша система класифікації, заснована на сукупності архітектурно-конструктивних та функціональних особливостей. При цьому виділяють шість класів: А+, А, В+, В, С, D. Для складів класу А+ висуваються ексклюзивні вимоги, а склади класу D можуть являти собою, навіть, частини неексплуатованих будівель.

Аналіз досліджень і публікацій. Однією з головних проблем при проектуванні промислових будівель взагалі і складських будівель зокрема є необхідність вибору ефективного варіанту конструкції покриття [12-14]. По відношенню до сталевих каркасних конструкцій, які переважно становлять основу несучого «скелету» сучасних складських будівель, це виявляється особливо актуальним – маса покриття безпосередньо впливає на вибір конструктивного рішення вертикальних несучих елементів, а при слабких та підпрацьованих ґрунтах, характерних для багатьох міст України, ще й на вибір конструктивного рішення фундаменту. Це в свою чергу впливає не тільки на кошторисні показники самого будівельного об'єкту, а ще пов'язано з питаннями надійності та безпеки його подальшої експлуатації.

Сучасні чинні стандарти України [15-17] висувають на перше місце не просто питання забезпечення традиційних технічних якостей будівельних конструкцій, таких як міцність, стійкість або жорсткість, а й питання забезпечення таких якостей за непередбачуваних умов, здатних викликати каскадне руйнування конструкції – прогресуюче обвалення [18]. В цьому питанні також ключову роль грає конструктивне рішення покриття будівлі.

Мета статті. На основі вищезазначеного метою даної статті є аналіз ефективності різних конструктивних рішень сталевого покриття сучасної складської будівлі.

Основна частина. В якості об'єкту досліджень була прийнята складська будівля, розташована в місті Дніпро. Будівля є одноповерховою з висотою поверху до стелі 10,8 м, а несучі конструкції виконані із традиційних прокатних профілів.

Загальний вигляд розглядуваної складської будівлі зображений на рис. 3, а її архітектурно-функціональний план зображений на рис. 4. Будівля складається з 3-х основних частин – зони прийому товарів, складської зони і обслуговуючої зони.

Основне складське приміщення, призначене безпосередньо для складування штучних товарів на стелажах, має квадрату в плані форму із розмірами 72 м × 72 м. В залежності від того, яким чином перекрито проліт в 72 м будівля буде належати до різних класів за міжнародною класифікацією: класу А в разі відстані між колонами не менше 24 м або класу В+ в разі відстані між колонами не менше 12 м. Тому в проекті розглядалися 3 основні конструктивні варіанти:

- варіант № 1 – перекриття прольоту двома сталевими фермами довжиною 36 м (для класу А);
- варіант № 2 – перекриття прольоту трьома сталевими фермами довжиною 24 м (для класу А);
- варіант № 3 – перекриття прольоту шістьма сталевими балками довжиною 12 м (для класу В+).

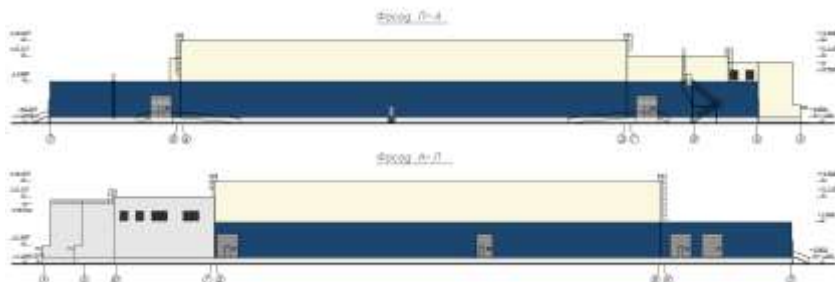


Рис. 3. Фронтальний та тильовий фасади складської будівлі

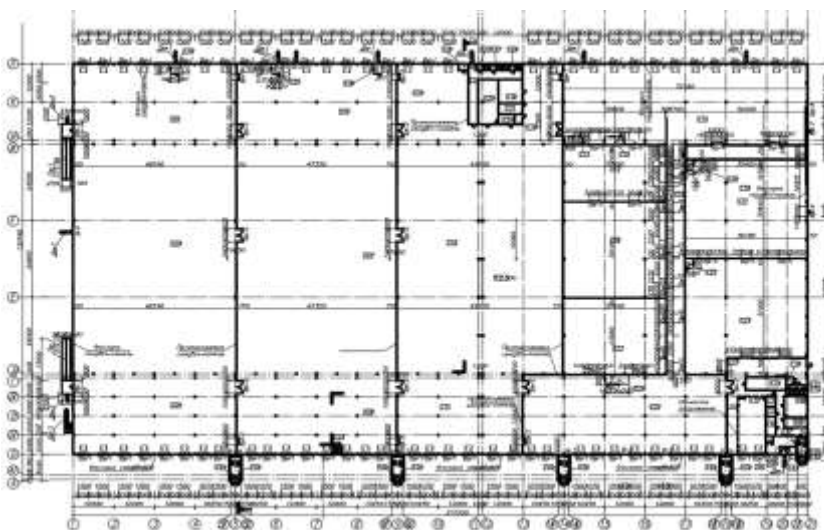


Рис. 4. План складської будівлі

Для вибору найбільш ефективного конструктивного варіанту із запропонованих був використаний чисельний аналіз із застосуванням методу скінчених елементів. Це є один з найпотужніших на сьогодні засобів аналізу роботи інженерних систем [19-22]. Аналіз роботи виконувався на основі вітчизняного проектно-обчислювального комплексу SCAD [23].

Клас сталі для конструкцій ферм приймався як мінімально можливий за стандартом [16] – клас С255, а для конструкцій балок – клас С440 для зниження їх висоти [24].

Побудовані скінченно-елементні моделі для розглядуваних конструктивних варіантів наведені на рис. 5. Ферми були прийняті з паралельними поясами, а решітка прийнята трикутна з додатковими стійками, профіль елементів – гнутозварний квадрат. Балка була прийнята зварна двотаврова, проте для

можливості підбору її поперечного перерізу в розрахункову модель був закладений прокатний двотавровий профіль.

Навантаження на конструктивні елементи приймалися відповідно до чинного стандарту України [25] – власна вага конструкції покриття та елементів несучих ригелів, снігове навантаження та вітрове навантаження.

Підібрані поперечні перерізи для розглядуваних конструктивних варіантів в проектно-обчислювальному комплексі SCAD з урахуванням уніфікації (для кроквяних ферм) представлені в табл. 1 (всі розміри подано в мм). В табл. 2 наведено розрахунок для всієї будівлі з урахуванням кількості конструктивних елементів покриття для кожного розглядуваного варіанту.

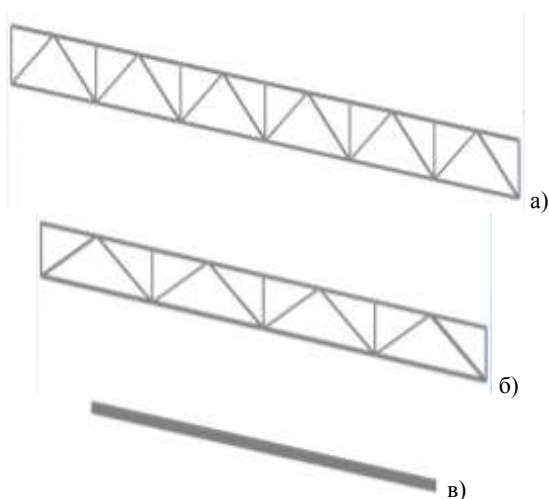


Рис. 5. Скінченно-елементі моделі конструктивних варіантів покриття:
а – варіант № 1; б – варіант № 2; в – варіант № 3

Таблиця 1

Елемент	Конструктивний варіант №		
	1	2	3
Верхній пояс	□ 160×5,5	□ 140×4,0	– 240×18
Нижній пояс	□ 150×5,0	□ 120×4,0	– 240×18
Стінка	—	—	– 560×12
Стійка	□ 140×4,0	□ 120×3,0	—
Розкоси	□ 120×3,0	□ 80×3,0	—
Загальна маса, кг	2 567	1 060	1 206

Таблиця 2

Конструктивний варіант	Маса елемента, кг	Кількість елементів	Загальна маса, кг
1	2 567	6	15 402
2	1 060	9	9 540
3	1 206	18	21 708

Як видно з отриманих даних конструктивний варіант № 2 виявляється найбільш ефективним. Саме він був прийнятий як остаточний і для нього розроблено остаточне конструктивне рішення – рис. 6. Відповідно до міжнародної класифікації даному складу може бути надано клас А, що безумовно підвищує його статусність та потужність.

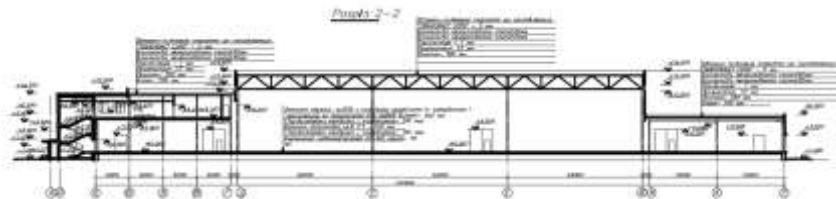


Рис. 6. Поздовжній переріз складської будівлі
(конструктивний варіант № 2)

Висновки. Таким чином на основі виконаного співставлення конструктивних варіантів несучих конструкцій покриття складської будівлі в місті Дніпро слід констатувати наступне:

1) з розглянутих трьох конструктивних варіантів для перекриття прольоту 72 м найефективнішим за масовим показником виявляється варіант з використанням ферм прольотом 24 м. Порівняно з варіантом використання двох ферм прольотом 36 м він має масу майже на 60 % нижчу, а в порівнянні із варіантом використання шести балок прольотом 12 м має масу майже на 130 % нижчу;

2) практична реалізація конструктивного варіанту з використанням ферм прольотом 24 м дозволяє забезпечити і крок рядів несучих колон рівним 24 м, що в свою чергу надає розглядуваній складській будівлі класу А за міжнародною класифікацією.

Також в якості подальших перспектив досліджень в розглядуваному напрямку слід відмітити можливість врахування сумісної роботи горизонтальних ригелів разом із вертикальними колонами.

Список літератури:

1. Новак В., Кириленко О., Розумова К., Игнатюк В. Організація міжнародних перевезень вантажів основними видами транспорту (огляд). *Наукоємні технології*. 2022. Вип. 1 (53). С. 70-76. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.53.16510>

2. Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки: монографія / за ред. В.О. Пінчук, Г.С. Прокудіна. Дніпро: Пороги, 2021. 536 с.

3. Проблеми організації, управління та підвищення ефективності транспортних перевезень: монографія / за ред. Л.М. Савчук, Г.С. Прокудіна. Дніпро: Пороги, 2021. 300 с.

4. Залізничні вантажні перевезення: монографія / З. Мельник та ін. *BRDO*, 2020. 134 с.

5. Ciziuniene K., Matijosius J., Liebuviene J., Sokolovskij E. Comparison of the relative importance of factors affecting the conveyance of bulk and liquid cargo. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 3, Article 1151. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14031151>

6. Мельник З. Відновлення транспортного сектору України – як зробити його «зеленим»? URL: <https://brdo.com.ua/analytics/vidnovlennya-transportnogo-sektoru-ukrayiny-yak-zrobuty-jogo-zelenym/> (дата звернення: 12.06.2024).

7. Момоток М. М. Організація складського господарства на сучасному етапі. *Управління розвитком*. 2014. № 8. С. 117-119.

8. Вавулін О.І. Управління складським господарством будівельного підприємства на засадах логістики. *Економіка і суспільство*. 2017. Вип. 10. С. 194-200.

9. ДК 018-2000. Державний класифікатор будівель та споруд. Київ: Держстандарт України, 2000. 83 с.

10. Банніков Д.О., Нікіфорова Н.А., Косячевська С.М. Сучасний стан класифікації транспортних будівельних конструкцій в Україні. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 21. С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/258221>

11. НК 018:2023. Національний класифікатор України. Класифікатор будівель і споруд. Чинний від 2024-01-01. Київ: Мінрегіон України, 2023. 17 с.

12. Kruhlikova N.G., Bannikov D.O. Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. Вип. 2 (80). С. 144-152. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>

13. Безсалий В.М., Банніков Д.О. Ефективність сталевих тонкостінних оцинкованих профілів для аркових елементів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. Вип. 16. С. 20-29. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428>

14. Bannikov D., Radkevich A., Nikiforova N. Features of the Design of Steel Frame Structures in India for Seismic Areas. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 348-354. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.348>

15. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі зміною № 1. Чинний від 2022-09-01. Київ: Мінрегіонбуд, 2018. 36 с.

16. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1. Чинний від 2015-01-01. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 220 с.

17. ДБН В.1.2-7:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. Чинний від 2022-09-01. Київ: Мінрегіон України, 2022. 13 с.

18. Радкевич А.В., Давидов І.І., Чабан В.П., Ковтун К.А. Аналіз методів розрахунку на прогресуюче обвалення одноповерхових каркасних виробничих будівель та пошук можливостей підвищення точності розрахунків. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 1 (19). С. 122-129. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.122.1032>

19. Ahmed S., Abdelhamid H., Ismail B., Ahmed F. Differential Quadrature Finite Element and the Differential Quadrature Hierarchical Finite Element Methods for the Dynamics Analysis of on Board Shaft. *European Journal of Computational Mechanics*. 2021. Vol. 4-6. No. 29. P. 303-344. DOI: <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179.29461>

20. Bofang Z. *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering*. 2018. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323>

21. Chen L.P., Yang Y.A. New Mixed Finite Element Method for Biot Consolidation Equations. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. 2020. Vol. 6. No. 12. P. 1520-1541. DOI: <https://doi.org/10.4208/aamm.OA-2019-0174>
22. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., & Fox D.D. *The finite element method for solid and structural mechanic*. 2014. 7-th edition. Elsevier LTD.
23. Fialko S., Karpilovskyi V. Time history analysis formulation in SCAD FEA software. *Journal of Measurements in Engineering*. 2018. Vol. 6. No. 4. P. 173-180. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2018.20408>
24. Hezentsvei Yu., Bannikov D. Effectiveness evaluation of steel strength improvement for pyramidal-prismatic bunkers. *Eureka: Physics and Engineering*. 2020. No. 2 (27). P. 30-38. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001146>
25. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі змінами № 1 та № 2. Чинний від 2007-01-01. Київ: Мінрегіонбуд України, 2006. 70 с.

References:

1. Novak, V., Kirilenko, O., Rozumova, K., Ignatjuk, V. (2022). Organizatsija gnarodnih perevezhen vantagiv osnovnimi vidami transportu (ogljad). [Organization of international cargo transportation by main types of transport (overview)]. *Scientific technologies*, 1 (53), 70-76. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.53.16510>.
2. Aktualni naprjami rozvitku tehnicnogo ta virobничого potencialu asoalnikomki. [Current trends in the development of the technical and production potential of the national economy]. (2021). Edited by V.O. Pinchuk., G.S. Prokudina. Dnipro: Porogi. 536 p.
3. Problemi organizatsii, upravlinnja ta pidvishennja efektyvnosti transportnih perevezhen. [Problems of organization, management and increasing the efficiency of transportation]. (2021). Edited by L.M. Savchuk., G.S. Prokudina. Dnipro: Porogi. 300 p.
4. Zaliznichni vantagni perevezhenja. [Railway freight transportation]. (2020). Melnik Z and oth. BRDO. 134 p.
5. Ciziuniene, K., Matijosius, J., Liebuviene, J., & Sokolovskij, E. (2024). Comparison of the relative importance of factors affecting the conveyance of bulk and liquid cargo. *Applied Sciences*, 14, 3, 1151. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14031151>.
6. Melnik, Z. (2024). Vidnovlennja transportnogo sektoru Ukraini – jak zrobiti jogo "zelenim"? [Restoration of the transport sector of Ukraine – how to make it "green"?]. URL: <https://brdo.com.ua/analytics/vidnovlennja-transportnogo-sektoru-ukrayiny-yak-zrobyty-jogo-zelenym/> (date of application: 12.06.2024).
7. Momotok, M.M. (2014). Organizatsija skladського gospodarstva na suchasnomu etapi. [Organization of storage facilities at the modern stage]. *Development management*, 8, 117-119.
8. Vavulin, O.I. (2017). Upravlinnja skladskim gospodarstvom budivelnogo pidpriemstva na zasadah logistiki. [Management of storage facilities of a construction enterprise on the basis of logistics]. *Economy and society*, 10, 194-200.
9. DK 018-2000. (2000). Dergavnij klassifikator budivel ta sporud. [State classifier of buildings and structures]. Kyiv: Dergstandart Ukraini. 83 p.
10. Bannikov, D.O., Nikiforova, N.A., Kosiachevska, S.M. (2022). Suchasnij stan klassifikatsii transportnih budivelnih konstruksij v Ukraini. [Modern state of

classification of transport building structures in Ukraine]. *Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 21, 35-43. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/258221>.

11. NK 018:2023. (2023). Natsionalnij klassifikator Ukraini. Klassifikator budivel I sporud. [National Classifier of Ukraine. Classification of buildings and structures]. Kyiv: Minregion Ukraini. 17 p.

12. Kruhlikova, N.G., Bannikov, D.O. (2019). Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and transport progress*, 2 (80), 144-152. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>.

13. Bezsalji, V.M., Bannikov, D.O. (2019). Efektivnist stalevih tonkostinnih otsinkovanih profiliv dlja arkovih elementiv. [Efficiency of thin-walled galvanized profiles for arch elements]. *Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 16, 20-29. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428>.

14. Bannikov, D., Radkevich, A., Nikiforova, N. Features of the Design of Steel Frame Structures in India for Seismic Areas. *Materials Science Forum*. 2019. Trans Tech Publications LTD. Vol. 968. P. 348-354. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.348>.

15. DBN V.1.2-14:2018. (2018). Sistema zabezpechennja nadijnosti ta bezpeki budivelnih objektiv. Zagalni printsipi zabezpechannja nadijnosti a osrkioibpki uaie sporud. [The system for ensuring the reliability and safety of construction objects. General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures]. Kyiv: Minregionbud Ukraini. 36 p.

16. DBN V.2.6-198:2014. (2014). Stalevi konstruksii. Normi proektuvannja. [Steel structures. Design standard]. Kyiv: Minregionbud Ukraini. 220 p.

17. DBN V.1.2-7:2021. (2022). Osnovni vimogi do budivel I sporud. Pogegna bezpeka. [Basic requirements for buildings and structures. Fire Security]. Kyiv: Minregion Ukraini. 13 p.

18. Radkevich, A.V., Davidov, I.I., Chaban, V.P., Kovtun, K.A. Analiz metodiv rozrahunku na progresujuce obvalennja odnoverhovih karkasnih virobnichin budivel ta poshuk moglivostej pidvishhnja tochnosti rozrahunkiv. [Analysis of calculation methods for progressive collapse of single-storey frame industrial buildings and search for opportunities to improve the accuracy of calculations]. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2024, 1 (19), 122-129. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.122.1032>.

19. Ahmed, S., Abdelhamid, H., Ismail, B., Ahmed, F. (2021). Differential Quadrature Finite Element and the Differential Quadrature Hierarchical Finite Element Methods for the Dynamics Analysis of on Board Shaft. *European Journal of Computational Mechanics*, 4-6, 29. P. 303-344. DOI: <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179-29461>.

20. Bofang, Z. (2018). *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323>.

21. Chen, L.P., Yang, Y.A. (2020). New Mixed Finite Element Method for Biot Consolidation Equations. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 6, 12. P. 1520-1541. DOI: <https://doi.org/10.4208/aamm.OA-2019-0174>.

22. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Fox D.D. (2014). *The finite element method for solid and structural mechanic*. 7-th edition. Elseveir LTD. (in English)

23. Fialko, S., Karpilovskyi, V. (2018). Time history analysis formulation in SCAD FEA software. *Journal of Measurements in Engineering*, 6, 4. P. 173-180. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2018.20408>.

24. Hezentsvei, Yu., Bannikov, D. (2020). Effectiveness evaluation of steel strength improvement for pyramidal-prismatic bunkers. *Eureka: Physics and Engineering*, 2 (27). P. 30-38. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001146>.

25. DBN V.1.2-2:2006. (2006). Systema zabezpechennja nadijnosti ta bezpeki budivelnih objektiv. Navantagennja i vplivi. Normi proektuvannja. [System for ensuring the reliability and safety of construction objects. Loads and impacts. Design standard]. Kyiv: Minregionbud Ukraini. 70 p.

Ye. Misiura

Comparison of structure variants covering of storage building

In connection with the constant increase in the volume and pace of freight transportation throughout the world, the creation of high-quality storage buildings is of particular importance. Unfortunately, in domestic practice, this aspect is given relatively little attention, and even specialized standards for the classification of building structures practically bypass this issue. However, in international practice, storage buildings are a more important construction object, which has a specialized classification based on a set of basic indicators. Moreover, the higher the class of the building, the higher its status and importance and, accordingly, the higher income it can bring to its owner. Therefore, the issue of upgrading the class of a storage building is quite relevant and significant.

One of the parameters that directly affects the classiness of the storage building is the distance between the columns. In the course of the research, three structural variants of the roof of a storage building with a steel frame, located in the city of Dnipro, were considered. The variants differed in the construction of the supporting beam and provided the possibility of overlapping spans of 36 m, 24 m and 12 m with a total span of the storage area of 72 m. During the numerical analysis, the finite element method was used using the domestic design and calculation complex SCAD.

As a result, it was established that the design variant using rafter trusses with a span of 24 m is more effective in terms of mass indicators than the variants for using rafter trusses with a span of 36 m (by 60 %) or beams with a span of 12 m (by 130 %). This made it possible to raise the class of the storage building according to the international classification from class B+ to class A. Detailed drawings were developed for the selected design option, which are planned for implementation in project practice.

Keywords: *storage building, steel truss, steel beam, finite element method, SCAD design and calculation complex.*