

Д.О. Банніков¹,
докт. техн. наук, професор
ORCID: 0000-0002-9019-9679

Н.А. Нікіфорова¹,
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0003-1922-8614

І.В. Леонтієва¹,
магістрант
ORCID: 0000-0001-6533-5600

¹Український державний університет науки і технологій

СПІВСТАВЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТАЛЕВОГО ТА КОМБІНОВАНОГО КАРКАСІВ

Останнім часом в практиці проектування все частіше перед замовниками проектних робіт та інвесторами різноманітних проектів постає дилема стосовно вибору будівельного матеріалу для несучих будівельних конструкцій. При цьому вибір, як правило, обмежується двома видами матеріалів – сталь та залізобетон. Кожен з цих матеріалів має свої переваги та недоліки, результатом чого є їх різна ефективність застосування для різноманітних типів будівельних конструкцій. Основну увагу при цьому відводять кошторисній стороні, оскільки в сучасних складних та динамічних умовах вона в багатьох випадках виявляється домінуючою.

У статті наведено результати досліджень виконаної магістерської дипломної роботи з порівняльного аналізу ефективності сталевого і комбінованого каркасів (сталевозалізобетонного) на прикладі будівлі фільтрувальної станції. Будівля має габарити в плані 54 × 36 м при загальній висоті близько 22 м. Її несучий каркас являє собою статично невизначені плоскі рами, що складаються з колон та ригелів у вигляді ферм. В поздовжньому напрямку будівлі рами об'єднані в просторову систему за допомогою конструкцій покриття. Будівля є безкрановою та має три поверхи кожен висотою близько 6,5 м.

В ході досліджень розглядувані варіанти поперечної рами аналізувались за допомогою методу скінчених елементів на базі багатофункціонального проектного комплексу ЛІРА-САПР. В результаті були отримані відповідні поперечні перерізи для навантажень за кліматичними умовами України. Співставлення варіантів показало, що перший конструктивний варіант виявляється на 9 % дешевшим. Приймаючи до уваги додаткові технологічні переваги при його виготовленні сталевий каркас може вважатись більш ефективним для розглянутих умов будівництва та бути рекомендованим для практичної реалізації. Окремо слід заважити, що такий каркас має також в середньому в 5 разів меншу загальну масу, що слід вважати його додатковою перевагою.

Ключові слова: *сталевий каркас, комбінований каркас, будівля, несуча поперечна рама, фільтрувальна станція.*

Постановка проблеми. В сучасних складних умовах світового тренду в будівельній галузі все частіше акцент як з боку замовників проектних робіт, так і інвесторів різного рівня робиться на економічній стороні проектування. Це примушує більш ретельно відноситись до вибору будівельного матеріалу для несучих конструктивних елементів будівельних конструкцій. При цьому доволі часто однозначної відповіді на те, який будівельний матеріал є більш ефективним, надати не вдається. Все залежить від конкретних умов будівництва, прив'язки будівельного об'єкту до місцевих умов, а також навіть від наявної бази із забезпечення будівництва як людськими ресурсами, так і матеріально-технологічними ресурсами.

Найбільш розповсюдженою виявляється ситуація, коли є можливість вибору між декількома будівельними матеріалами, з яких потенційно можуть створюватись несучі конструктивні елементи майбутньої конструкції. До таких матеріалів частіше за все належать сталь і залізобетон. Історично вони обидва почали широко впроваджуватись в проектну практику починаючи з середини XIX сторіччя. І також історично почали створювати один одному конкуренцію в прагненні захопити наявний ринок в будівельній галузі. Проте сукупність властивостей кожного з цих матеріалів призвела до того, що однозначно неможливо надати одному з них повну перевагу. Тому в кожному конкретному випадку потрібно проводити принаймні узагальнені дослідження та оцінки із встановленням ефективності того чи іншого будівельного матеріалу.

Аналіз досліджень і публікацій. На тепер в Україні є чинними наступні нормативні стандарти з питань термінології, розрахунку та конструювання сталевих [1] і залізобетонних [2] будівельних конструкцій. Вони ідеологічно дещо різняться, оскільки перший з них більш орієнтований на вітчизняні принципи і традиції, а другий – на європейські. З метою підвищення конкурентоспроможності сталевих конструкцій фахівцями був розроблений та представлений новий стандарт [3, 4], який регламентує принципи і практичні методи, що дозволяють ефективніше використовувати сталь в будівельних конструкціях.

Також автори в свій час вже звертались до даної проблеми в ході своїх досліджень, а отримані результати представлені в роботах [5-7]. При цьому було виявлено, що в сталевих конструкціях наявні певні резерви несучої здатності, що дійсно дозволяє підвищити ефективність її використання в сталевих будівельних конструкціях.

В закордонній практиці дане питання практично не розглядається фахівцями, оскільки проблематика вибору ефективного будівельного матеріалу вочевидь не так гостро стоїть, як для сучасної України.

Мета статті. На основі вищезазначеного метою даної статті є аналіз ефективності застосування сталі та залізобетону для несучих поперечних рам каркасів будівель.

Основна частина. В якості об'єкту досліджень була прийнята будівля фільтрувальної станції. Вона являє собою прямокутну в плані конструкцію із прибудовою, призначеною для адміністративно-господарської частини. Розміри в плані основної будівлі станції становлять 54×36 м при загальній висоті близько 22 м – рис. 1. Будівля є триповерховою із висотою кожного з поверхів близько 6,5 м. Обладнання для фільтрування води розташовано на перших двох поверхах – рис. 2. Кранове обладнання не передбачено проектом.

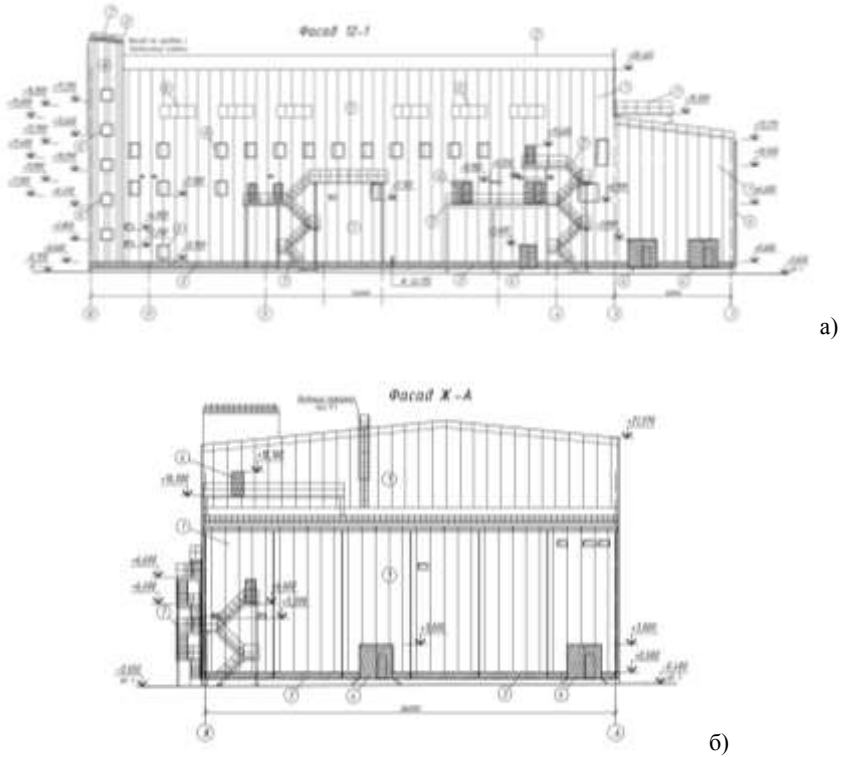


Рис. 1. Фронтальний (а) та боковий (б) фасади будівлі фільтрувальної станції

Конструктивне рішення фільтрувальної станції передбачає несучі поперечні рами, що складаються із колон та горизонтальних ригелів, виконаних у вигляді ферм – рис. 3. В поздовжньому напрямку будівлі рами об'єднані в просторову системою за допомогою конструкцій покриття.

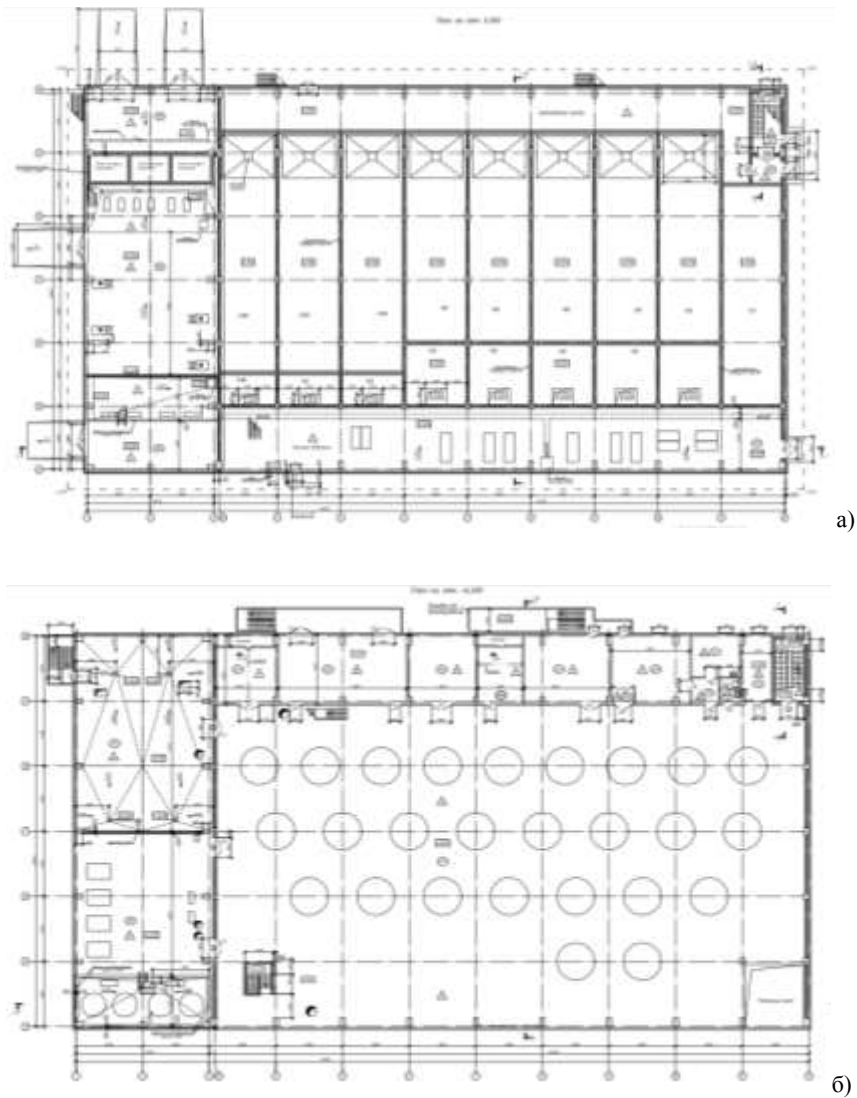


Рис. 2. Плани першого (а) і другого (б) поверхів
будівлі фільтрувальної станції

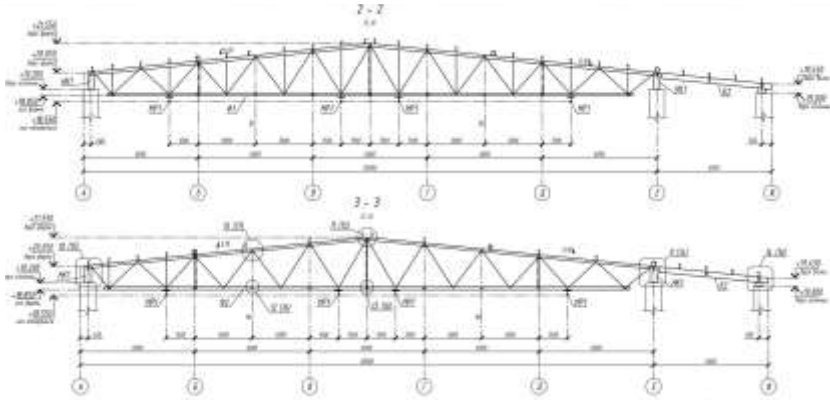


Рис. 3. Фрагменти поперечних розрізів будівлі фільтрувальної станції

Для аналізу роботи несучої рами каркасу будівлі використовувався один з найбільш розповсюджених на тепер чисельних методів будівельної механіки – метод скінчених елементів [8-11]. Цей метод має надзвичайно широкі можливості в сфері як проектування, так і дослідження роботи будівельних конструкцій, що неодмінно використовується фахівцями [12-15].

В ході представлених робіт практична реалізація методу скінчених елементів була прийнята на базі багатофункціонального проектного комплексу ЛІРА-САПР вітчизняної розробки [16]. Такий вибір був обумовлений відносною доступністю цього програмного комплексу з однієї сторони та доволі потужними його можливостями в сфері аналізу будівельних задач з іншої сторони (наприклад, [17]).

В процесі досліджень аналізувались конструктивні рішення для двох варіантів поперечної несучої рами. Варіант № 1 являв собою раму, повністю виконану із прокатних сталевих гарячекатаних елементів. Варіант № 2 являв собою раму комбінованого конструктивного рішення, в якому колони виконані із залізобетонних прямокутних елементів, а ригель у вигляді ферми являє собою сталеву ферму з прокатних профілів. Побудовані скінченно-елементні моделі для обох варіантів наведені на рис. 4, відповідно. Навантаження на елементи рами задавалось відповідно до чинного нормативного документу [18] з урахуванням змін до нього [19].

В ході аналізу роботи несучих рам були отримані відповідні результати у вигляді мозаїк напружено-деформованого стану. Для обох розглядуваних варіантів найбільш характерні результати представлені на рис. 5 і 6. Підібрані поперечні перерізи несучих конструктивних елементів наведені для обох варіантів несучої рами в табл. 1 (всі розміри подані в мм).

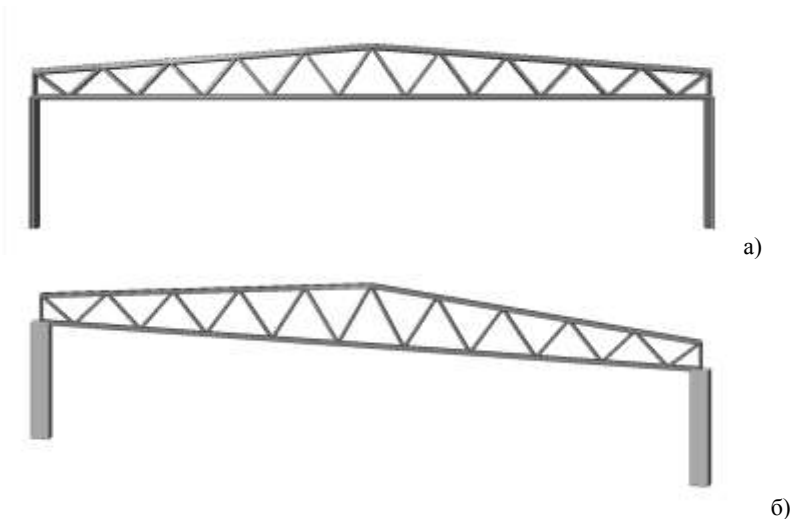


Рис. 4. Скінченно-елементні моделі несучої поперечної рами будівлі фільтрувальної станції для варіанту № 1 (а) і варіанту № 2 (б)

Таблиця 1

Елемент поперечної рами		Варіант № 1		Варіант № 2	
		профіль	матеріал	профіль	матеріал
Ферма	пояси	□200×160×8	сталь С345	□200×160×8	сталь С345
	розкоси	□120×6	сталь С255	□120×6	сталь С255
Колона	стержень	I20K1	сталь С245	□800×450	бетон С20/25
	арматура	—	—	Ø12,20,28	A400С, A240С

Зазначимо, що в табл. 1 перерізи для елементів сталеві ферми підібрані за стандартом [20], а для елементів сталевих колон – за стандартом [21]. Для залізобетонної колони використовувались необхідні дані відповідно до чинного нормативного документу [2].

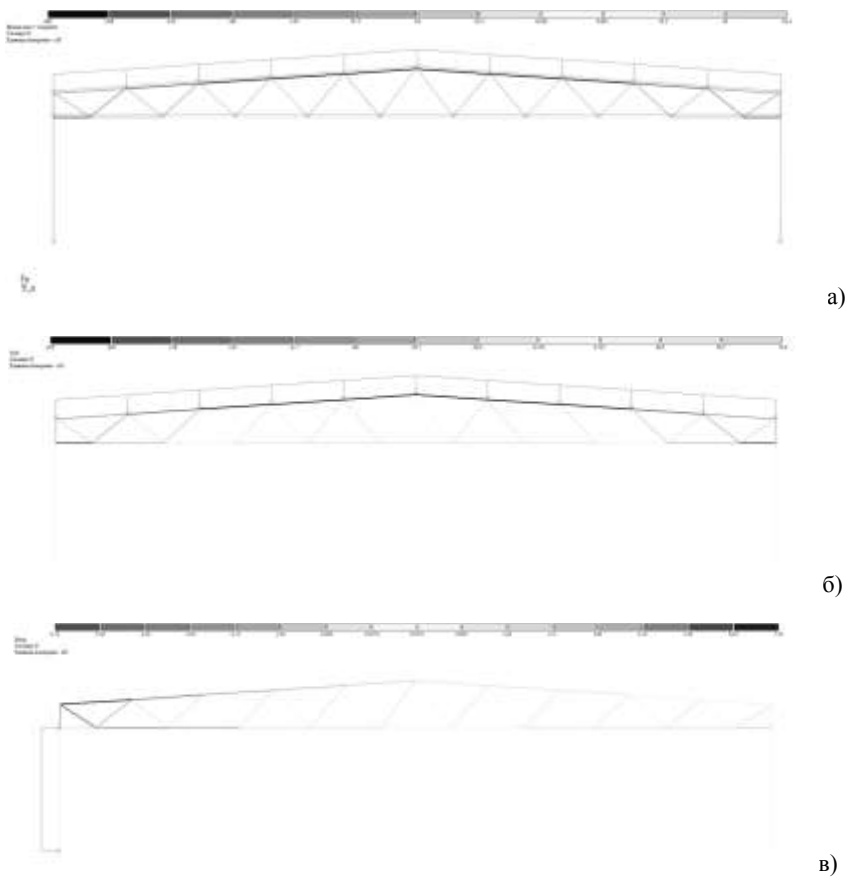


Рис. 5. Мозаїка поздовжніх зусиль в елементах рами варіанту № 1 від дії власної ваги (а), снігового навантаження (б), вітрового навантаження (в)

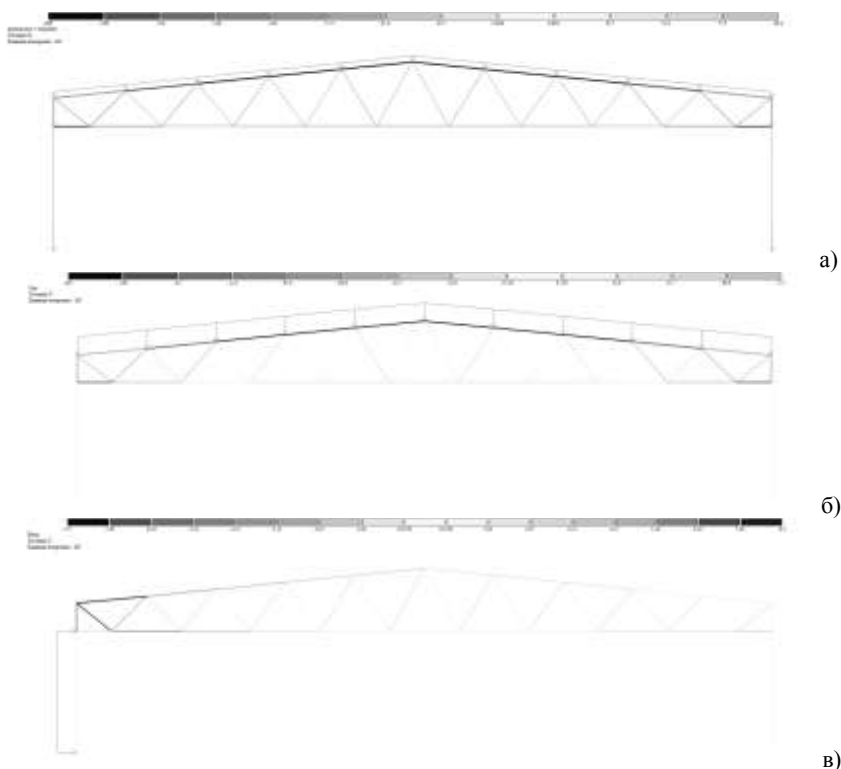


Рис. 6. Мозаїка поздовжніх зусиль в елементах рами варіанту № 2 від дії власної ваги (а), снігового навантаження (б), вітрового навантаження (в)

За результатами підбору перерізів елементів несучої поперечної рами була складена результуюча таблиця, що дозволяє оцінити ефективність кожного з розглядуваних конструктивних варіантів. При цьому враховувалась кошторисна вартість металопрокату та бетону на сучасному ринку України. Узагальнені дані наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Варіант	Елемент	Матеріал	Маса, т	Вартість 1 т, грн.	Вартість загальна, грн.
1	Ферма	сталь С345	1,63	61 460	170 544
		сталь С255	0,90		
	Колона	сталь С 245	0,43	35 000	
2	Ферма	сталь С345	1,63	61 460	185 767
		сталь С255	0,90		
	Колона	бетон С20/25	3,74 м ³	2 720 за м ³	
		арм. А400С, А240С	0,57	35 260	

Висновки. Таким чином на основі виконаного співставлення конструктивних варіантів несучої поперечної рами будівлі фільтрувальної станції середніх габаритів для умов України слід констатувати наступне:

1) конструктивний варіант рами, виконаний повністю зі сталевих прокатних профілів має на 9 % нижчу вартість, ніж конструктивний варіант, виконаний за комбінованою схемою зі сталі і залізобетону;

2) загальна маса конструктивного варіанту рами, виконаного повністю зі сталевих профілів виявляється в середньому в 5 разів меншою, ніж для конструктивного варіанту, виконаного за комбінованою схемою зі сталі і залізобетону.

Також в якості подальших перспектив досліджень в розглядуваному напрямку слід заважити, що при проведенні практичних оцінок важливо врахувати додатково такі фактори як відстань до підприємств з виготовлення сталевих або залізобетонних конструкцій, а також ступінь агресивності середовища, в якому відбуватиметься експлуатація розглядуваних будівельних конструкцій. Ці фактори визначають додаткові витрати на транспортування та експлуатацію розглядуваних конструкцій і можуть змінити кошторисний баланс на користь одного чи іншого конструктивного варіанту.

Список літератури:

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. 2014. Київ: Мінрегіонбуд України. 205 с.
2. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. 2011. Київ: Мінрегіонбуд України. 71 с.
3. ДСТУ XXXX. Конструкції сталеві будівельні. Настанова з оцінювання якості конструктивних рішень (проект, перша редакція). 2020. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 42 с.
4. ДСТУ XXXX. Конструкції сталеві будівельні. Настанова з оцінювання якості конструктивних рішень (проект, восьма редакція). 202X. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 44 с.
5. 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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.348>
6. 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. <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>.
7. 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. <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428>.
8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Fox D.D. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics: 7-th edition. 2014. Elsevier LTD, 624 p.
9. Bofang Z. The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering, 2018. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 843 p.
10. 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. No. 4-6, Vol. 29. P. 303-344. <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179.29461>.

11. Kumar A., Shitole P., Ghosh R., Kumar R., Gupta A. Experimental and numerical comparisons between finite element method, element-free Galerkin method, and extended finite element method predicted stress intensity factor and energy release rate of cortical bone considering anisotropic bone modelling. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part h-journal of engineering in medicine*. 2019. 11.No. 8, Vol. 233. P. 823-838. <https://doi.org/10.1177/0954411919853918>.
12. Chen LP., Yang Y. A New Mixed Finite Element Method for 'Not Consolidation Equations. *Advances in applied mathematics and mechanics*. 2020. No. 6, Vol. 12. P. 1520-1541. <https://doi.org/10.4208/aamm.OA-2019-0174>.
13. Tiutkin O., Petrosian N., Radkevych A. & Alkhdour A. Regularities of Stress State of Unsupported Working Occurring in a Layered Massif. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. Article 00100. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900100>.
14. Dubinchyk O., Petrenko V., Ihnatenko D., Kildieiev V. Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. Article 00020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900020>.
15. Kuprii V., Petrenko V., Kuprik S., Kripak Ye. Numerical analysis of changing the force factors in temporary lining at the tunnel construction by the NATM. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. Article 00044. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900044>.
16. LIRALAND Group. URL: <https://www.liraland.ua/company>.
17. Тюткін О.Л., Мірошник В.А., Гелетюк І.В. Комплексний аналіз конструкції стовбуру Дніпровського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2021. Вип. 19. С. 91-98. <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233992>.
18. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження та впливи. Норми проектування. 2006. Київ: Мінрегіонбуд України. 70 с.
19. Зміна № 2 до ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. 2020. Київ: Мінрозвитку громад та територій. 6 с.
20. ДСТУ 8940:2019. Труби сталеві профільні. Технічні умови. 2019. Київ: Мінекономрозвитку України. 12 с.
21. ДСТУ 8768:2018. Двогаври сталеві гарячекатані. Сортамент. 2018. Київ: Мінекономрозвитку України. 8 с.

References:

1. DBN V.2.6-198:2014. (2014). Stalevi konstruktsii. Normi proektuvannja. [Steel structures. Design standard]. Kyiv: Minregionbud Ukraini. 205 p.
2. DBN V.2.6-98:2009. (2011). Konstruktsii budinkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni pologennja. [Buildings and structures. Concrete and reinforced-concrete structures. Main points]. Kyiv: Minregionbud Ukraini. 71 p.
3. DSTU XXXX. (2020). Konstruktsii stalevi budivelni. Nastanova z otsinjuvannja jakosti konstruktivnih rishen (proekt, persha redaktsija). [Construction steel structures. Attitude for estimation of structure solutions quality (project, the first redaction)]. Kyiv: DP "UkrNDNTS". 42 p.
4. DSTU XXXX. (2020). Konstruktsii stalevi budivelni. Nastanova z otsinjuvannja jakosti konstruktivnih rishen (proekt, vosma redaktsija). [Construction steel structures. Attitude for estimation of structure solutions quality (project, the eight redaction)]. Kyiv: DP "UkrNDNTS". 44 p.

5. 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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.348>.
6. Kruhlikova, N.G., Bannikov, D.O. (2019). Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Nauka ta progress transportu*, 2 (80), 144-152. <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>.
7. Bezsalyi, V.M., Bannikov, D.O. (2019). Efektivnist stalevih tonkostinnih otsinkovanih profiliv dlja arkovih elementiv. [Efficiency of thin-walled galvanized profiles for arch elements]. *Mosti ta tuneli: teorija, doslidennja, praktika*, 16, 20-29. <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428>.
8. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Fox, D.D. (2014). The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanic: 7-th edition. Elseveir LTD. 624 p.
9. Bofang, Z. (2018). The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. 843 p.
10. 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, 303-344. <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179.29461>.
11. Kumar, A., Shitole, P., Ghosh, R., Kumar, R., Gupta, A. (2019). Experimental and numerical comparisons between finite element method, element-free Galerkin method, and extended finite element method predicted stress intensity factor and energy release rate of cortical bone considering anisotropic bone modelling. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part h-journal of engineering in medicine*, 8, 233, 823-838. <https://doi.org/10.1177/0954411919853918>.
12. Chen, L.P., Yang, Y. (2020). A New Mixed Finite Element Method for 'Not Consolidation Equations. *Advances in applied mathematics and mechanics*, 6, 12, 1520-1541. <https://doi.org/10.4208/aamm.OA-2019-0174>.
13. Tiutkin, O., Petrosian, N., Radkevych, A., Alkhdour, A. (2019). Regularities of Stress State of Unsupported Working Occurring in a Layered Massif. E3S Web of Conferences, 109, 00100. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900100>.
14. Dubinchyk, O., Petrenko, V., Ihnatenko, D., Kildieiev, V. (2019). Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *E3S Web of Conferences*, 109, 00020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900020>.
15. Kupri, V., Petrenko, V., Kuprik, S., Kripak, Ye. (2019). Numerical analysis of changing the force factors in temporary lining at the tunnel construction by the NATM. *E3S Web of Conferences*, 109, 00044. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900044>.
16. LIRALAND Group. Regim dostupu: <https://www.liraland.ua/company>.
17. Tiutkin, O.L., Miroshnyk, V.A., Heletiuk, I.V. Kompleksnij analiz konstruktsii stovburu Dniprovskogo metropoliteny. [Comprehensive analysis of the shaft structure of the Dnipro metro]. *Mosti ta tuneli: teorija, doslidennja, praktika*, 19, 91-98. <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233992>.
18. DBN V.1.2-2:2006. (2006). Systema zabezpechennja nadijnosti ta bezpeki budivelnih ob'ektiv. 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.

19. Zmina № 2 do DBN V.1.2-2:2006. (2020). Navtagennja i vplivi. Normi proektuvannja. [Change № 2. Loads and impacts. Design standard]. Kyiv: Minrozvitku gromad ta teritorij. 6 p.

20. DSTU 8949:2019. (2019). Trubi stalevi profilni. Tehnichni umovi. [Steel profile pipes. Specifications]. Kyiv: Minekonomrozvitku Ukraini. 12 p.

21. DSTU 8768:2018. (2018). Dvotavri stalevi harjachekatanni. Sortiment. [Hot-rolled steel beams. Assortment]. Kyiv: Minekonomrozvitku Ukraini. 8 p.

D. Bannikov, N. Nikiforova, I. Leontieva

Comparison of efficiency for steel and combined frames

Recently, in the practice of design, customers of design works and investors of various projects have a dilemma regarding the choice of building material for load-bearing building structures. At the same time, the choice is usually limited to two types of materials – steel and reinforced concrete. Each of these materials has its advantages and disadvantages, which results in their different efficiency of application for various types of building structures. At the same time, the main attention is paid to the estimation side, because in modern complex and dynamic conditions, it turns out to be dominant in many cases.

The article presents the results of research of the completed master's thesis on the comparative analysis of the effectiveness of steel and combined frames (steel-reinforced concrete) on the example of the filter station building. The building has dimensions in plan of 54×36 m with a total height of about 22 m. Its supporting frame is a statically nondefined flat frame consisting of columns and crossbars in the form of trusses. In the longitudinal direction of the building, the frames are united into a spatial system by means of covering structures. The building is craneless and has three floors, each about 6.5 m high.

In the course of research, the considered variants of the transverse frame were analyzed using the finite element method on the basis of the LIRA-CAD multifunctional design complex. As a result, appropriate cross-sections for loads according to the climatic conditions of Ukraine were obtained. A comparison of variants showed that the first design variant is 9 % cheaper. Taking into account the additional technological advantages in its manufacture, the steel frame can be considered more effective for the given construction conditions and be recommended for practical implementation. Separately, it should be noted that such a frame also has an average of 5 times less total mass, which should be considered its additional advantage.

Keywords: *steel frame, combined frame, building, load-bearing transverse frame, filter station.*

Посилання на статтю:

APA: Bannikov, D., Nikiforova, N., & Leontieva, I. (2023). Comparison of efficiency for steel and combined frames. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 51, 182-193.

ДСТУ: Банніков Д.О., Нікіфорова Н.А., Леонтієва І.В. Співставлення ефективності сталевих та комбінованих каркасів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. № 51. С. 182-193.