

УДК 004.92:[624.012.45+624.016](624.94)

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВУЗЛІВ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КАРКАСНО- МОНОЛІТНИХ БУДІВЕЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗРАХУНКУ ТА БУДІВЕЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Адаменко В. М.¹, Дзюбко Д. А., Романишен О. В.¹

¹Київський національний університет будівництва та архітектури

Анотація: Сталезалізобетонні каркасно-монолітні будівлі інтегрують в собі переваги сумісної роботи залізобетону та жорсткого армування у вигляді сталевих профілів. Комбінація сталевих профілів, бетону і стержневої арматури має ряд переваг порівняно з звичайними залізобетонними конструкціями, які активно використовуються, зокрема, при зведенні висотних будівель, та дозволяють збільшити міцність і жорсткість елементів конструкцій та, в цілому, забезпечити несучу здатність конструктивних елементів при значно менших їх геометричних розмірах перерізів. Розвиток інформаційних технологій розрахунку будівельних конструкцій, зокрема, методів скінченно-елементного аналізу з використанням 3D скінченних елементів в лінійній та нелінійній постановках задач, а також, технології будівельного інформаційного моделювання, дозволяють досліджувати складні випадки сумісної роботи сталевих жорсткого армування, бетону і стержневої арматури, у тому числі, в вузлах сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель, та виконувати конструювання перерізів в 3D інформаційній моделі з подальшим отриманням конструктивних креслень.

В даній роботі на прикладі 25-ти поверхової сталезалізобетонної каркасно-монолітної будівлі за допомогою інформаційних технологій розрахунку та будівельного інформаційного моделювання досліджено напружено-деформований стан вузлів в лінійній та фізично нелінійній постановках задач. Зокрема, досліджено вузол сполучення трубобетонних колон крайнього ряду в рівні перекриття над першим поверхом з зовнішньою сталевією оболонкою у вигляді труби 630x15 в трьох варіантах: трубобетонні колони (варіант 1), трубобетонні колони з жорстким армуванням перехресними сталевими смугами (варіант 2), трубобетонні колони з жорстким армуванням перехресними двотаврами (варіант 3).

За результатами нелінійних розрахунків для варіанту з трубобетонними колонами без додаткового армування отримано перерозподіл внутрішніх зусиль в колонах порівняно з лінійним розрахунком, зокрема збільшення величини напружень в зовнішній сталевій оболонці близько 24.54% та їх зменшення близько 66.34% в бетонному осерді колон, проте, за наявності додаткового сталевих жорсткого армування такого перерозподілу, зокрема, приросту величин напружень в сталевих елементах колон не відбувається. Середня величина перерозподілу згинальних моментів в плитах перекриття склала 29.7%. З аналізу величин напружень в сталевій оболонці і сталевому жорсткому армуванні колон, отриманих з нелінійного розрахунку, підтверджено закономірність до їх зниження зі зростанням величини сталевих жорсткого армування, з величини 326 МПа (для варіанту 1) до 255 МПа (для варіанту 2) і 216 МПа (для варіанту 3).

Ключові слова: інформаційні технології, будівельне інформаційне моделювання, 3D моделювання, BIM-технології, BIM моделювання, BIM, залізобетонні конструкції, сталезалізобетонні конструкції, залізобетонні каркасно-монолітні будівлі, сталезалізобетонні каркасно-монолітні будівлі, вузли каркасно-монолітних будівель, лінійний статичний розрахунок, фізично нелінійний статичний розрахунок.

STRESS-STRAIN STATE INVESTIGATION OF NODES OF COMPOSITE STEEL-REINFORCED CONCRETE FRAME-MONOLITHIC BUILDINGS USING INFORMATION TECHNOLOGY FOR STRUCTURAL ANALYSIS AND BUILDING INFORMATION MODELING

V. Adamenko¹, D. Dziubko¹, O. Romanyshen¹

¹*Kyiv National University of Construction and Architecture*

Abstract: Composite steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings integrate the advantages of combined work of concrete and rigid reinforcement in the form of steel profiles. The combination of steel profiles, concrete, and reinforcement bars has several advantages compared to conventional reinforced concrete structures, particularly in the construction of high-rise buildings, allowing for increased strength and stiffness of structural elements and overall load-bearing capacity with significantly smaller geometric dimensions of cross-sections. The development of information technologies for structural analysis, including finite element methods using 3D finite elements in linear and nonlinear problem formulations, as well as building information modeling technology, enables the investigation of complex cases of interaction between steel rigid reinforcement, concrete, and reinforcement bars, including in the nodes of steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings, and allows for designing cross-sections in a 3D information model with subsequent generation of construction drawings.

In this study, using information technologies for structural analysis and building information modeling, the stress-strain state of nodes is investigated in both linear and physically nonlinear problem formulations, taking the example of a 25-story steel-reinforced concrete frame-monolithic building. Specifically, the node connection of tubular concrete columns at the outer row at the level of the floor above the first level with an external steel shell in the form of a tube 630x15 is examined in three variants: tubular concrete columns (variant 1), tubular concrete columns with rigid reinforcement by cross steel strips (variant 2), tubular concrete columns with rigid reinforcement by cross I-beams (variant 3).

Based on the results of nonlinear analysis, for the variant with tubular concrete columns without additional reinforcement, a redistribution of internal forces in the columns compared to linear analysis is observed. Particularly, there is an increase in stress magnitude in the external steel shell by approximately 24.54% and a decrease by about 66.34% in the concrete core of the columns. However, in the presence of additional steel rigid reinforcement, such redistribution, including the increase in stress magnitude in the steel elements of the columns, does not occur. The average redistribution of bending moments in the floor slabs amounted to 29.7%. An analysis of stress values in the steel shell and steel rigid reinforcement of the columns obtained from nonlinear analysis confirms a tendency for their decrease with increasing magnitude of steel rigid reinforcement, ranging from 326 N/mm² (for variant 1) to 255 N/mm² (for variant 2) and 216 N/mm² (for variant 3).

Keywords: information technologies, building information modeling, 3D modeling, BIM technologies, BIM modeling, BIM, reinforced concrete structures, composite steel-reinforced concrete structures, reinforced concrete frame-monolithic buildings, composite steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings, nodes of frame-monolithic buildings, linear structural analysis, physically nonlinear structural analysis.

1 ВСТУП

Сталезалізобетонні каркасно-монолітні будівлі інтегрують в собі переваги сумісної роботи залізобетону та жорсткого армування у вигляді сталевих профілів. Комбінація сталевих профілів, бетону і стержневої арматури має ряд переваг порівняно з звичайними залізобетонними конструкціями, які активно використовуються, зокрема, при зведенні висотних будівель, та дозволяють збільшити міцність і жорсткість елементів конструкцій та, в цілому, забезпечити несучу здатність конструктивних елементів при значно менших їх геометричних розмірах перерізів. Розвиток інформаційних технологій розрахунку будівельних конструкцій, зокрема, методів скінченно-елементного аналізу з використанням 3D скінченних елементів в лінійній та нелінійній постановках задач, а також, технології будівельного інформаційного моделювання, дозволяють досліджувати складні випадки сумісної роботи сталевих жорсткого армування, бетону і стержневої арматури, у тому числі, в вузлах сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель, та виконувати конструювання перерізів в 3D інформаційній моделі з подальшим отриманням конструктивних креслень.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В роботі [1] на основі розробленої нелінійної 3D скінченно-елементної моделі в ПК ABAQUS досліджено поведінку двох залізобетонних балок, що завантажені в чотирьох точках при дії змінних циклів завантаження - розвантаження. Отримані результати були звірені з результатами експериментальних досліджень залізобетонних балок. Автори роботи [2], за допомогою прикладного пакету скінченно-елементного моделювання FEMAP, виконали моделювання пошкоджених залізобетонних балок прольотом 1900 мм, розглянуто шість варіантів пошкоджень балок, які моделювалися за рахунок видалення скінченних елементів балок. Числові дослідження залізобетонних балок без попереднього напруження та попередньо напружених із зовнішнім армуванням балок проведені в роботі [3] на основі скінченно-елементної моделі в ПК ABAQUS в припущенні сумісності деформацій бетону і сталевих армувань. Отримані результати міцності бетону, напружень в зовнішніх сталевих стержнях, прогинів, картин тріщиноутворення співставлялися з результатами експериментальних досліджень балок. Автори роботи [4] запропонували нелінійну скінченно-елементну модель для розрахунку попередньо напружених залізобетонних балок, в якій попередньо напружена арматура моделюється полігональними скінченними елементами, що знаходяться в товщі залізобетонної балки.

Числовому моделюванню залізобетонної плити товщиною 200мм та розмірами 5x7м, з різними граничними умовами на контурі, присвячена робота [5], яка була проведена за допомогою ПК Autodesk Robot Structural Analysis Professional, ПК Dlubal Software RFEM і ПК ABC Plate в нелінійній постановці задачі. Методика експериментальних досліджень деформованого стану монолітного ребристого перекриття силосу та чисельне моделювання його напружено-деформованого стану представлено в роботах [6, 7]. В роботі [8], на прикладі моделювання залізобетонної плити в ПК Ліра-САПР, для різних варіантів граничних умов на контурі, показано, що крутні моменти в залізобетонних плитах при розрахунках на основі моделі із плоских скінченних елементів можуть суттєво відрізнятись від фактичних крутних моментів. Це в свою чергу може призвести до помилок при визначенні головних моментів, і далі, помилок при визначенні моменту тріщиноутворення та величин прогинів. Автори дослідження [9] за допомогою ПК SAP2000 виконали моделювання залізобетонних

ребристих та кесонних плит перекриттів в лінійній та нелінійній постановці задач. Для розрахунку використані багатошарові скінченні елементи, що включали верхній шар бетону, шар армування та нижній шар бетону. Фізико-механічні характеристики бетону і арматури відповідали значенням прийнятим при натурних дослідженнях залізобетонних плит, проведених іншими авторами. За результатами дослідження, представлено порівняльний аналіз отриманих результатів чисельних розрахунків з результатами розглянутих варіантів експериментальних досліджень.

Вплив підвищених температур на нерозрізну статично невизначену залізобетонну балку був досліджений в роботі [10]. 3D скінченно-елементна модель побудована в ПК ABAQUS та в першу чергу використана для розрахунків залізобетонної балки на термічні впливи, на наступному кроці, було безпосередньо проведено статичний розрахунок балки в нелінійній постановці задачі. Результати числових досліджень співставлені з натурними випробуваннями залізобетонних балок, приведено аналіз перерозподілу згинальних моментів у балках при впливі підвищених температур. Числове моделювання за допомогою спеціально розробленого програмного комплексу скінченно-елементного аналізу сталезалізобетонної восьмиповерхової каркасної будівлі із широко відомих натурних випробувань каркасних будівель на вплив пожежі (Cardington Corner fire test), які були проведені в м. Кардінгтон з 1994 по 1997 роки міжнародними компаніями BRE та British Steel (зараз Tata Steel), було проведено автором в роботі [11]. За результатами зроблено висновок, що для якісного врахування в розрахунках мембранного ефекту в залізобетонних плитах при їх великих переміщеннях, варто розробити більш досконалий механізм чисельного моделювання. Подібні дослідження [12], проте в даному випадку, за допомогою комерційного програмного комплексу ABAQUS, були проведені також для сталезалізобетонної восьмиповерхової каркасної будівлі із третього тесту натурних випробувань в м. Кардінгтон (Cardington Corner fire test). Об'єктно-орієнтований фреймворк OpenSees, що дає можливість користувачам створювати скінченно-елементні додатки для моделювання роботи конструктивних елементів, дозволив авторам роботи [13] розробити застосунок, в якому було реалізовано термомеханічний багатошаровий нелінійний скінченний елемент оболонки, що дозволяє моделювати досить великі переміщення в плитах, які виникають за умов температурних впливів, а також, враховувати пластичність та теплове розширення. Результати роботи додатку були підтверджені шляхом моделювання роботи залізобетонних плит при впливах підвищених температур та їх зв'язки з широко відомими результатами натурних випробувань будівельних конструкцій на вплив пожежі, які були проведені в м. Кардінгтон (Cardington Corner fire test). Розроблений додаток з відкритим доступом дозволяє дослідникам і інженерам проводити розрахунки залізобетонних плит за умов термічних впливів. В публікації [14] запропоновано та теоретично обгрунтовано використання приведенного перерізу при скінченно-елементному аналізі сталезалізобетонних плит за умов температурних впливів, що дозволяє спростити розрахунок сталезалізобетонних плит при термічних впливах до рівня розрахунку звичайних залізобетонних плит.

Розвиток методів розрахунку і конструювання сталевих будівель і споруд проаналізовано в роботі [15]. На прикладі Ейфелевої вежі, яка на момент зведення була найвищою у світі вежею (312.12м), та Національного стадіону сингапурського спортивного комплексу, який є найбільшим у світі сталевим куполом (діаметр 310м), прослідковано зміну підходів до розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд, розглянуто традиційні ручні підходи до проектування будівель, та сучасні інформаційні технології розрахунку та конструювання сталевих конструкцій. В роботі [16] за допомогою ПК Dlubal RSTAB та ПК Dlubal RFEM, виконано моделювання напружено-деформованого стану, а також підбір перерізів складних просторових

сталевих конструкцій аеропорту відповідно до норм Єврокод. Вітрові навантаження, які діють на будівлю визначені з використанням віртуальної аеродинамічної труби та акселерограм, за допомогою CFD-аналізу в ПК Dlubal RWIND Simulation.

Автори роботи [17] за допомогою ПК ABAQUS побудували скінченно-елементну модель для розрахунку центрально-стиснутих трубобетонних колон. В даному випадку застосовані чотирьохвузлові скінченні елементи оболонки та восьмивузлові просторові скінченні елементи. Для верифікації коректності отриманих результатів було зібрано і використано залежності $N-\epsilon$ або $N-\Delta$ для 142-х круглих, 154-х квадратних та 44-х прямокутних зразків трубобетонних колон. В праці [18] запропонована нова скінченно-елементна модель для розрахунку круглих позацентрово-стиснутих трубобетонних колон, приведені теоретичні залежності і обґрунтування запропонованої методики, верифікація результатів розрахунку виконана на основі 95-ти натурних випробувань трубобетонних колон інших дослідників. В роботі [19] за допомогою ПК ABAQUS розроблена нелінійна 3D скінченно-елементна модель для коротких трубобетонних колон. Розрахунки проведені відповідно до вимог Єврокод 4, додатково, результати розрахунків були звірені з даними експериментальних досліджень інших авторів. Дослідження трубобетонних центрально-стиснутих колон круглого та квадратного перерізу з діаметром (стороною) 150мм за допомогою ПК ABAQUS представлено в роботі [20]. В даному випадку, розглянуто також варіанти армування трубобетонних колон жорсткою арматурою у вигляді хрестового елемента, а також, швелероподібного для колон квадратного перерізу. Верифікація скінченно-елементної моделі виконана шляхом співставлення результатів з даними експериментальних досліджень інших авторів.

На основі даних отриманих при реалізації 35-ти будівельних проєктів автори роботи [21] продемонстрували переваги використання будівельного інформаційного моделювання, серед них, зокрема, зменшення вартості проєкту в цілому, більш якісний контроль, зменшення тривалості проєктування, більш якісна взаємодія між фахівцями різних розділів проєкту. В роботі [22], на основі огляду більш ніж 250 публікацій, автори представили детальний аналіз поточного стану застосування технологій будівельного інформаційного моделювання при проєктуванні, зведенні і експлуатації будівель, розглянули основних виробників програмного забезпечення і їхні основні продукти, зокрема, Autodesk Revit, Navisworks, Bentley Architecture, Graphisoft ArchiCAD, Tekla, Nemetschek Allplan. Акцентовано увагу на досить низький відсоток використання будівельного інформаційного моделювання при експлуатації, реконструкції та демонтажі будівель. Переваги та поточний стан інтеграції технологій будівельного інформаційного моделювання в будівельну галузь на рівні архітекторів, інженерів та лінійних інженерно-технічних працівників проаналізовано в роботі [23].

Приклад сумісного використання інформаційних технологій розрахунку та будівельного інформаційного моделювання при проєктуванні залізобетонних і сталезалізобетонних каркасних будівель приведений в роботі [24]. Досвід впровадження будівельного інформаційного моделювання в навчальний процес при реалізації освітньої програми підготовки інженерів-будівельників, в роботі [25]. Досвід створення 3D інформаційної моделі існуючої історичної будівлі 16-го століття (Palace Ettoreo in Sacile, Італія) на основі даних лазерного сканування, за допомогою 3D моделювання в ПК EasyCUBE Virtualgeo та ПК Revit приведений в праці [26]. За допомогою будівельного інформаційного моделювання в ПК Revit, разом із застосуванням технології Dypamo, автори роботи [27] привели приклад проєктування сталезалізобетонних балок мосту. Окрім цього, продемонстровано імпорт інформаційної моделі в ПК ABAQUS для подальшого скінченно-елементного аналізу конструкцій. В роботі [28] на основі побудованих 3D будівельних інформаційних моделей виконана систематизація та запропоновані нові види вузлових з'єднань

сталезалізобетонних конструкцій. Дослідження виконано на основі існуючих прототипів будівель. Питання армування залізобетонних конструкцій розглянуто в роботах [29, 30]. Автори дослідження [29] запропонували автоматизувати процес армування залізобетонних плит. В даному алгоритмі спочатку отримується необхідна вихідна інформація з будівельної інформаційної моделі та скінченно-елементної моделі. На першому кроці виконується розкладання армування відповідно до результатів розрахунків, на другому, оптимізація його розміщення. Приведені практичні приклади роботи запропонованого алгоритму. В роботі [30] запропоновано спосіб армування залізобетонних конструкцій на основі інформації отриманої з будівельної інформаційної моделі, шляхом її оптимізації за допомогою генетичного алгоритму. Спеціально розроблений для цієї цілі фреймворк, що отримує інформацію з будівельної інформаційної моделі, виконує покрокове розкладання армування, відповідно поздовжньої розтягнутої, поздовжньої стиснутої та поперечної, а також дозволяє виконати 3D візуалізацію отриманого результату.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціллю роботи є дослідження напружено-деформованого стану вузлів сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель на прикладі 25-ти поверхової будівлі за допомогою інформаційних технологій розрахунку та будівельного інформаційного моделювання, а також, виявлення ефектів, які виникають при розрахунках сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель у лінійній та фізично нелінійній постановках задач.

Задачами дослідження є:

- створення за допомогою об'ємних скінченних елементів уточненої розрахункової моделі на основі загальної скінченно-елементної моделі сталезалізобетонної каркасно-монолітної будівлі, яка враховує дійсний напружено-деформований стан вузлів, у лінійній та фізично нелінійній постановці задач;
- розрахунок уточненої скінченно-елементної моделі у лінійній та фізично нелінійній постановці задач, а також, аналіз отриманих результатів напружено-деформованого стану вузлів.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглядається 25-ти поверхова сталезалізобетонна каркасно-монолітна будівля з габаритними розмірами в плані 14x30.6 м, висотою поверхів 3.3 м, з підвальним, цокольним та технічним поверхами. Вся необхідна інформація щодо послідовності створення будівельної інформаційної моделі в ПК САПФІР та розрахункової моделі в ПК Ліра-САПР, прийнятих характеристиках жорсткості та додаткових розрахункових даних приведена в роботі [24].

За результатами розрахунку скінченно-елементної моделі сталезалізобетонного каркасу з трубобетонними колонами в ПК Ліра-САПР отримані внутрішні зусилля в конструктивних елементах каркасу, виконаний підбір перерізів трубобетонних колон та армування залізобетонних стін і плит перекриття. Для подальших досліджень був обраний вузол сполучення трубобетонних колон крайнього ряду в рівні перекриття над першим поверхом з зовнішньою сталевією оболонкою у вигляді труби 630x15 в трьох варіантах: трубобетонні колони (варіант 1), трубобетонні колони з жорстким армуванням перехресними сталевими смугами (варіант 2), трубобетонні колони з жорстким армуванням перехресними двотаврами (варіант 3).

При побудові уточненої розрахункової моделі в лінійній постановці задачі, колони першого і другого поверхів, які примикають до вказаного вузла, були виконані з

універсальних просторових восьмивузлових (№36) та шестивузлових (№34) ізопараметричних скінченних елементів. Розмір сторони для більшості скінченних елементів склав 60мм. Зовнішня сталева оболонка має товщину, що відповідає товщині труби (15мм) і змодельована у вигляді суцільного масиву разом із внутрішнім бетонним осердям. Скінченно-елементна модель залізобетонної плити, що виконана з універсальних прямокутних (№41), чотирикутних (№44) та трикутних (№42) скінченних елементів оболонки, в межах примикання до 3D просторових скінченних елементів колон, була модифікована для забезпечення сумісності вузлів. Будівельна інформаційна модель вузла варіанту 1 у ПК Tekla Structures приведена на Рис. 1.

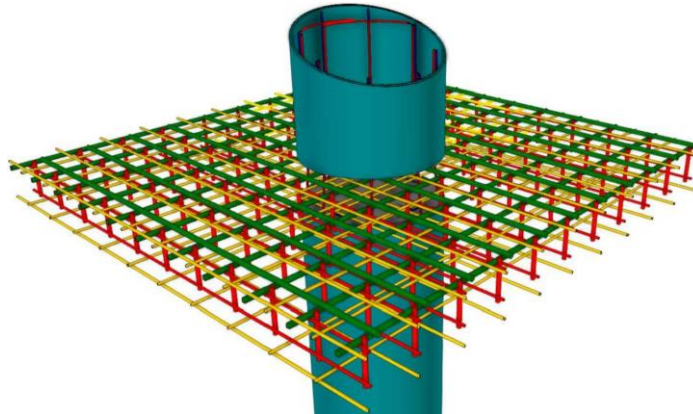


Рис. 1. Будівельна інформаційна модель вузла варіанту 1 у ПК Tekla Structures

Побудова уточненої розрахункової моделі в нелінійній постановці задач, виконана на основі відповідної лінійної моделі. В даному випадку, конструктивні елементи монолітного розтертку, зовнішніх стін і стін ядра жорсткості, монолітних сходових маршів і площадок, плит перекриття змодельовані фізично нелінійними універсальними прямокутними (№241), чотирикутними (№244) та трикутними (№242) скінченними елементами оболонки. Колони першого і другого поверхів, які примикають до розглядуваного вузла, були змодельовані фізично нелінійними універсальними просторовими восьмивузловими (№236) та шестивузловими (№234) ізопараметричними скінченними елементами.

Фізично нелінійні скінченні елементи № 241, 242 і 244 є багатошаровими скінченними елементами, відповідно, наявність армування плит перекриття задана у вигляді відповідних шарів армування, розміщених у верхній та нижній зонах плити перекриття. Товщина плит перекриття прийнята 250мм. Нелінійні параметри бетону і арматури плит перекриття та колон задані у вигляді закону нелінійного деформування №14 відповідно для бетону класу C32/40, арматури класу A500C і класу сталі C285. Моделювання нелінійних завантажень виконано покроковим методом, прийнято 10 рівномірних кроки завантаження розрахункової моделі.

Для вузла сталезалізобетонної каркасно-монолітної будівлі варіанту 1 (трубобетонні колони), мозаїка еквівалентних напружень N_z для сталевих оболонки і бетонного осердя за результатами лінійних та нелінійних розрахунків приведена на рис.2 і 3, мозаїка еквівалентних напружень M_x і M_y в плиті перекриття за результатами лінійних та нелінійних розрахунків приведена на рис.4 і 5. Результати розрахунків внутрішніх зусиль (напружень) для вузла сталезалізобетонної каркасно-монолітної будівлі варіанту 1 (трубобетонні колони) в лінійній та нелінійній постановках задач, а також, їх різниця приведені в таблиці 1.

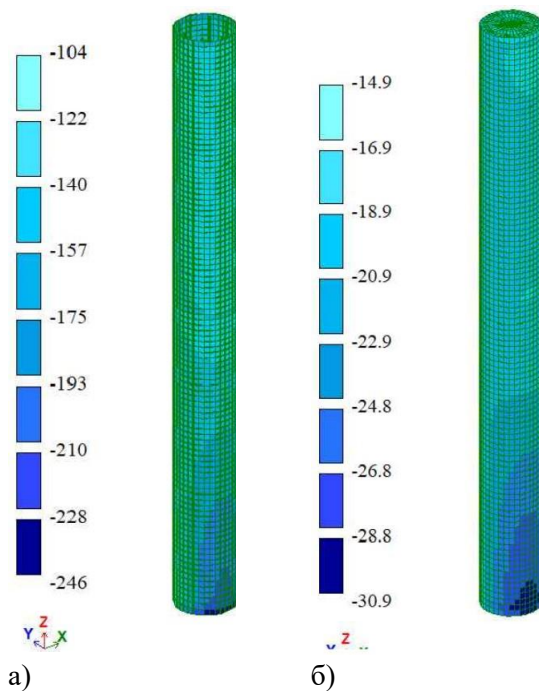


Рис. 2. Мозаїка еквівалентних напружень N_z за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 1 (трубобетонні колони), Н/мм² (а — сталева оболонка, б — бетонне осердя)

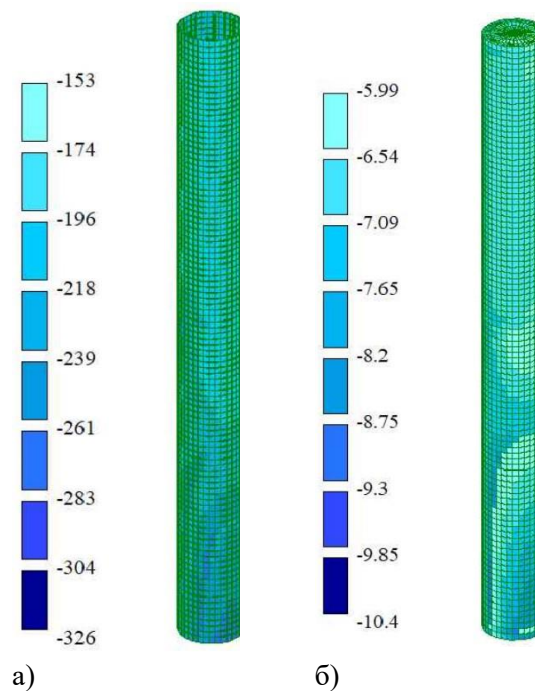


Рис. 3. Мозаїка еквівалентних напружень N_z за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 1 (трубобетонні колони), Н/мм² (а — сталева оболонка, б — бетонне осердя)

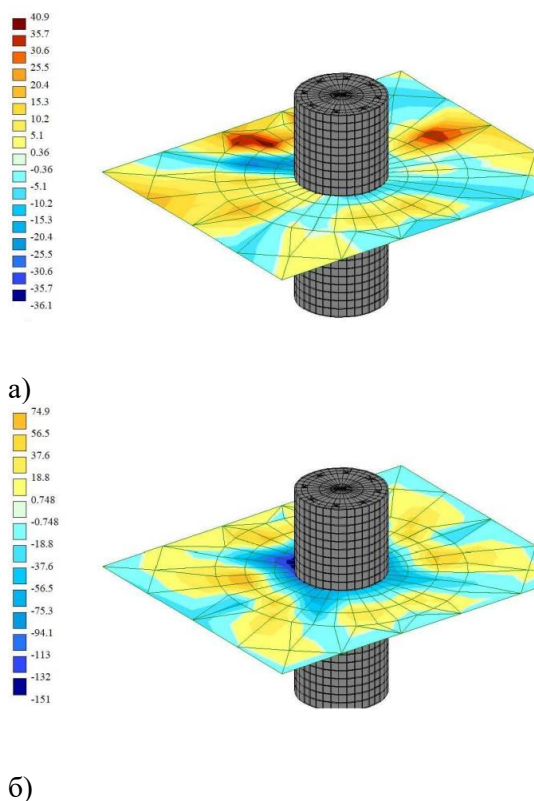


Рис. 4. Мозаїка еквівалентних напружень M_x (а) і M_y (б) в плиті за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 1, (кН*м)/м.п.

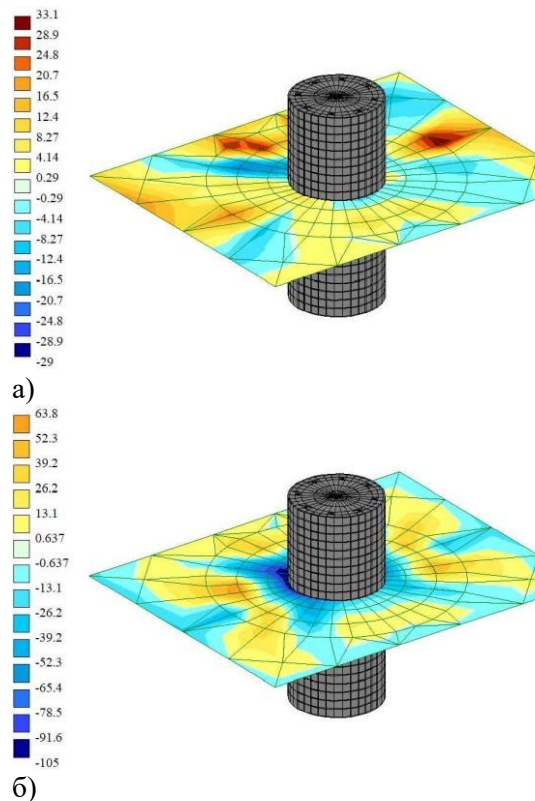


Рис. 5. Мозаїка еквівалентних напружень M_x (а) і M_y (б) в плиті за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 1, (кН*м)/м.п.

Таблиця 1

Внутрішні зусилля (напруження) у вузлі варіанту 1 (трубобетонні колони)									
Внутрішні зусилля, напруження	Сталева оболонка		Δ , %	Бетонне осердя		Δ , %	Плита перекриття		Δ , %
	ліній.	нелін.		ліній.	нелін.		ліній.	нелін.	
N_x , Н/мм ²	-76,1	-71,8	5,99	-5,58	-2,57	53,94	-23,5	-4,06	82,72
N_y , Н/мм ²	-50,6	-99,5	49,15	-25,2	-2,72	89,21	-4,1	-50,9	-92,94
N_z , Н/мм ²	-246	-326	24,54	-30,9	-10,4	66,34	-	-	-
M_x , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	40,9	33,1	19,07
M_y , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-151	-105	43,81
M_{xy} , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-58,7	-50	14,82

Будівельна інформаційна модель вузла варіанту 2 та варіанту 3 у ПК Tekla Structures приведена на рис. 6.

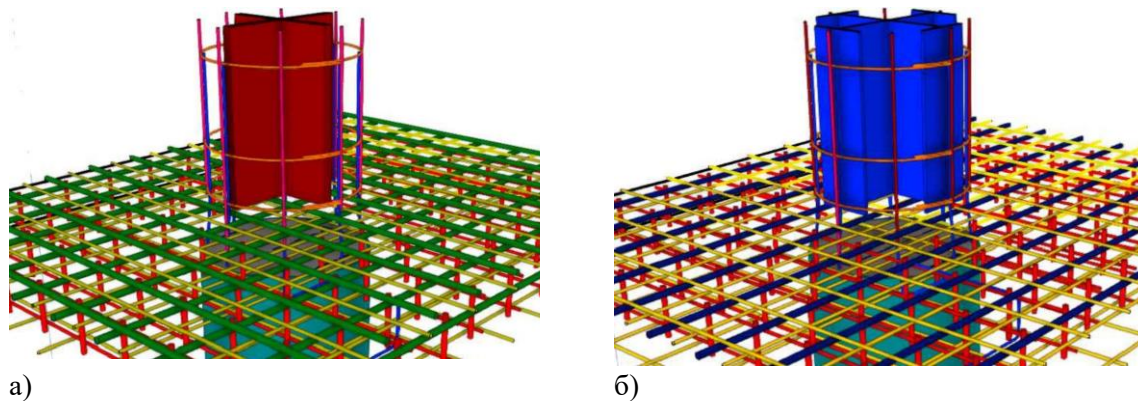


Рис. 6. Будівельна інформаційна модель вузла варіанту 2 (а) та варіанту 3 (б) у ПК Tekla Structures

Мозаїка еквівалентних напружень N_z для сталевої оболонки і сталевому жорсткому армування та бетонного осердя за результатами лінійних та нелінійних розрахунків приведена для вузла варіанту 2 на рис.7 і 8, для вузла варіанту 3 на рис. 11 і 12. Мозаїка еквівалентних напружень M_x і M_y в плиті перекриття за результатами лінійних та нелінійних розрахунків приведена для вузла варіанту 2 на рис.9 і 10, для вузла варіанту 3 на рис. 13 і 14. Результати розрахунків внутрішніх зусиль (напружень) для вузла варіантів 2 та 3, а також, їх різниця приведені в таблицях 2 і 3 відповідно.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

При нелінійних розрахунках порівняно з лінійними, для варіанту 1 (табл. 1) спостерігається збільшення напружень N_z в сталевій оболонці близько 24.54% та їх зменшення близько 66.34% в бетонному осерді колон. Для варіанту 2 та варіанту 3 аналогічного приросту напружень N_z в сталевій оболонці і сталевій жорсткій арматурі не відбувається, натомість їх зменшення в бетонному осерді колон становить близько 70.58 та 63.43% відповідно. Зменшення згинальних моментів в плитах перекриття для варіанту 1 складає близько 19.07% (M_x) і 43.81% (M_y), для варіанту 2 близько 61.31% (M_x) і 24.83% (M_y), для варіанту 3 близько 13.35% (M_x) і 15.95% (M_y).

З аналізу величин напружень N_z в сталевій оболонці і сталевому жорсткому армуванні, отриманих за результатами нелінійного розрахунку, спостерігається чітка закономірність до їх зниження зі зростанням величини сталевому жорсткому армування, 326 МПа (для варіанту 1), 255 МПа (для варіанту 2), 216 МПа (для варіанту 3).

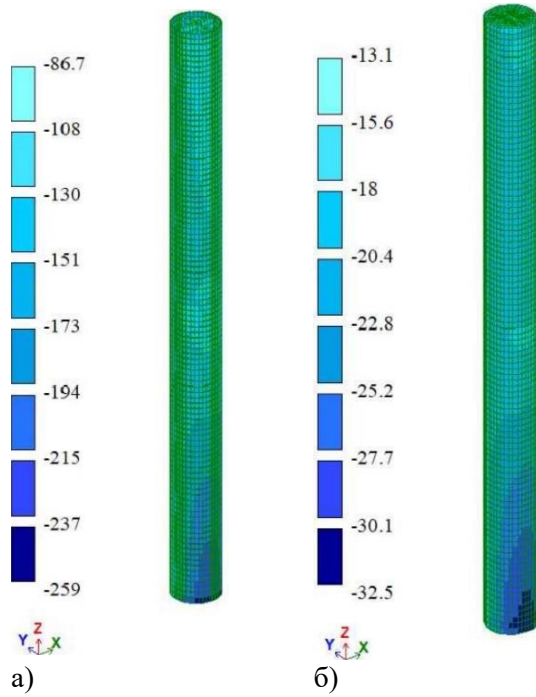


Рис. 7. Мозаїка еквівалентних напружень N_z за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 2 (перехресні смуги), Н/мм² (а — сталеве армування, б — бетонне осердя)

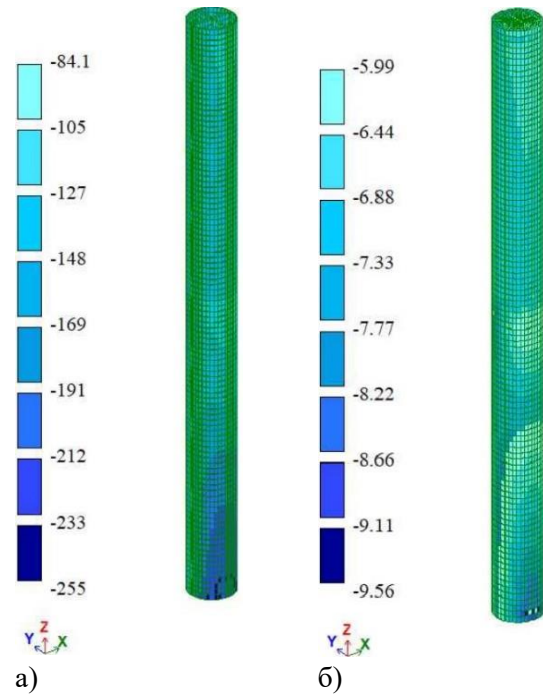


Рис. 8. Мозаїка еквівалентних напружень N_z за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 2 (перехресні смуги), Н/мм² (а — сталеве армування, б — бетонне осердя)

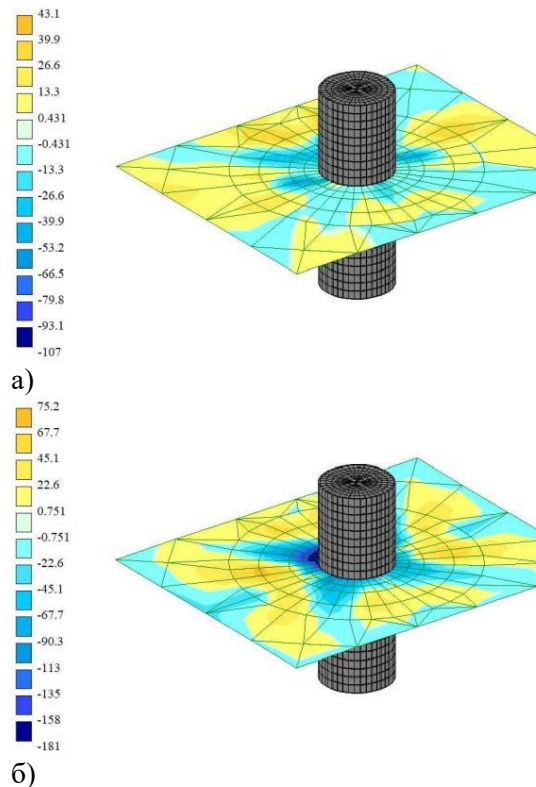


Рис. 9. Мозаїка еквівалентних напружень M_x (а) і M_y (б) в плиті за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 2, (кН*м)/м.п.

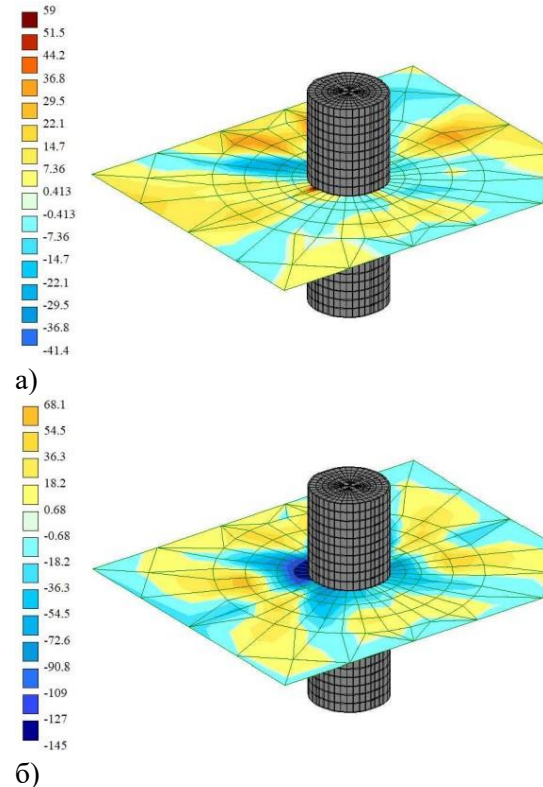
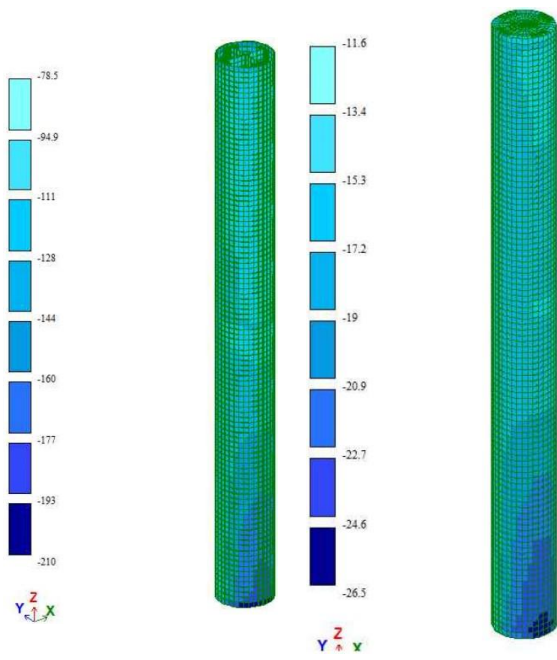
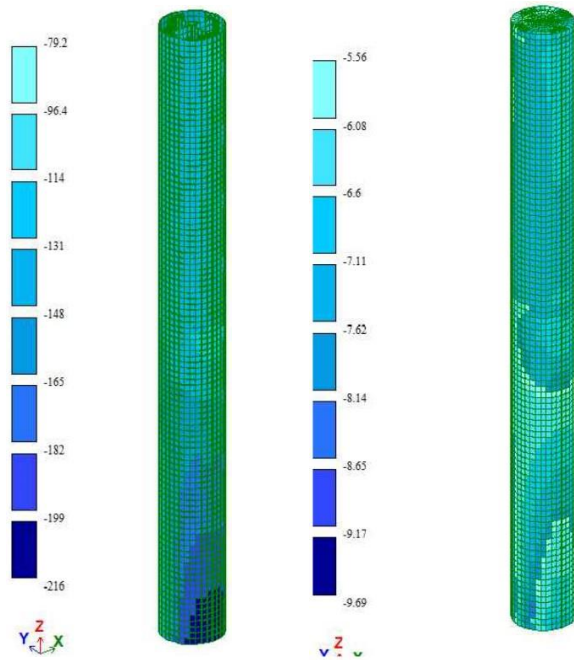


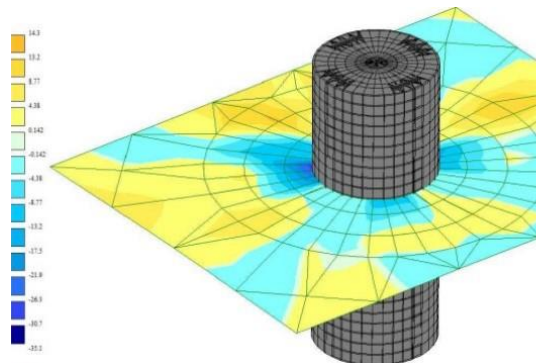
Рис. 10. Мозаїка еквівалентних напружень M_x (а) і M_y (б) в плиті за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 2, (кН*м)/м.п.



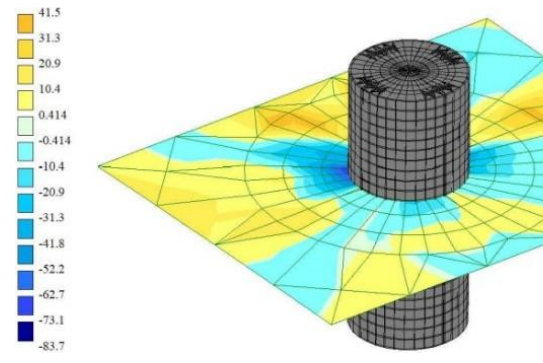
а) б)
Рис. 11. Мозаїка еквівалентних напружень Nz за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 3 (перехресні двотаври), Н/мм² (а — сталеве армування, б — бетонне осердя)



а) б)
Рис. 12. Мозаїка еквівалентних напружень Nz за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 3 (перехресні двотаври), Н/мм² (а — сталеве армування, б — бетонне осердя)



а) б)
Рис. 13. Мозаїка еквівалентних напружень Mx (а) і My (б) в плиті за результатами лінійних розрахунків вузла варіанту 3, (кН*м)/м.п.



а) б)
Рис. 14. Мозаїка еквівалентних напружень Mx (а) і My (б) в плиті за результатами нелінійних розрахунків вузла варіанту 3, (кН*м)/м.п.

Таблиця 2

Внутрішні зусилля (напруження) у вузлі варіанту 2 (перехресні смуги)

Внутрішні зусилля, напруження	Сталеве армування		Δ , %	Бетонне осердя		Δ , %	Плита перекриття		Δ , %
	ліній.	нелін.		ліній.	нелін.		ліній.	нелін.	
N_x , Н/мм ²	-76,4	-80,4	4,97	-5,8	-6,53	11,18	-20,8	-31,7	34,38
N_y , Н/мм ²	-47,3	-51,8	8,69	-8,15	-6,43	21,1	-5,62	-15,4	63,51
N_z , Н/мм ²	-259	-255	1,57	-32,5	-9,56	70,58	-	-	-
M_x , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-107	-41,4	61,31
M_y , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-181	-145	24,83
M_{xy} , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-70,9	-64	9,73

Таблиця 3

Внутрішні зусилля (напруження) у вузлі варіанту 3 (перехресні двотаври)

Внутрішні зусилля, напруження	Сталеве армування		Δ , %	Бетонне осердя		Δ , %	Плита перекриття		Δ , %
	ліній.	нелін.		ліній.	нелін.		ліній.	нелін.	
N_x , Н/мм ²	-64,2	-70	8,29	-5,38	-5,16	4,1	-13,1	-19,7	33,5
N_y , Н/мм ²	-62,8	-66,5	5,56	-8,6	-6,77	21,28	-11,8	-17,7	33,3
N_z , Н/мм ²	-210	-216	2,78	-26,5	-9,69	63,43	-	-	-
M_x , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-96,6	-83,7	13,35
M_y , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	-163	-137	15,95
M_{xy} , (кН*м)/м.п.	-	-	-	-	-	-	55,3	55	0,5

6 ВИСНОВКИ

1) За результатами нелінійних розрахунків для варіанту з труобетонними колонами без додаткового армування отримано перерозподіл внутрішніх зусиль в колонах порівняно з лінійним розрахунком, зокрема збільшення величини напружень в зовнішній сталевій оболонці близько 24.54% та їх зменшення близько 66.34% в бетонному осерді колон, проте, за наявності додаткового сталевого жорсткого армування такого перерозподілу, зокрема, приросту величин напружень в сталевих елементах колон не відбувається. Середня величина перерозподілу згинальних моментів в плитах перекриття склала 29.7%.

2) З аналізу величин напружень в сталевій оболонці і сталевому жорсткому армуванні колон, отриманих з нелінійного розрахунку, підтверджено закономірність до їх зниження зі зростанням величини сталевого жорсткого армування, з величини 326 МПа (для варіанту 1) до 255 МПа (для варіанту 2) і 216 МПа (для варіанту 3).

7 ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку компанії ЛІРА САПР в особі її директора, д.т.н., професора Барабаш М.С. за надане ліцензійне програмне забезпечення.

8 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори підтверджують, що не мають жодних фінансових або нефінансових інтересів, які могли б вплинути на об'єктивність та достовірність даного дослідження.

Література

1. Earij, A., Alfano, G., Cashell, K., & Zhou, X. (2017). Nonlinear three-dimensional finite-element modelling of reinforced-concrete beams: Computational challenges and experimental validation. *Engineering Failure Analysis*, 82, 92-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.025>
2. Mykhalevskiy N. A., Vegeera P. I., Blikharskiy Z. Y. (2023). Analysis of the effect of uneven damage of reinforced concrete beam using the FEMAP software package. *Modern construction and architecture*, 6, 54-61. DOI: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-54-61>
3. Swoo-Heon Lee, Ali Abolmaali, Kyung-Jae Shin, Hee-Du Lee. (2020). ABAQUS modeling for post-tensioned reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering*, 30, Article 101273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101273>
4. Moreira L. S., Sousa J. B. M., Parente E. (2018). Nonlinear finite element simulation of unbonded prestressed concrete beams, *Engineering Structures*, 170, 167-177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.077>
5. Mikulaj J., Szolomicki J. (2019). Numerical modelling of RC floor slabs. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 586, Article 012031, DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/586/1/012031>
6. Адаменко В.М. Методика експериментальних досліджень деформованого стану монолітного ребристого перекриття силосу. Містобудування та територіальне планування. 2015. Вип.55. С. 9-13.
7. Адаменко В. М. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану монолітного ребристого перекриття силосу. Основи та фундаменти. 2015. Вип.36. С. 48-56.
8. Азізов Т. Н., Перейрас Р. До розрахунку залізобетонних плит методом скінчених елементів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2023. Вип.43. С. 85-92. DOI: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i43.10>
9. Recalde, B. R. B., Gastal, F. P. S. L., Bessa, V. R. D., & Schwetz, P. F. (2015). Numerical analysis of waffle slabs in flexure considering the effects of concrete cracking. *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais*, 8(2), 225-247. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000200009>
10. Li Z, Ding F, Cheng S. (2021). Numerical investigation on moment redistribution of continuous reinforced concrete beams under local fire conditions. *Advances in Structural Engineering*, 24(15), 3375-3388. DOI: <https://doi.org/10.1177/136943322111026226>
11. Wang Y. C. (2000). An analysis of the global structural behaviour of the Cardington steel-framed building during the two BRE fire tests. *Engineering Structures*, 22(5), 401-412. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00127-8)
12. Gillie M., Usmani A. S., Rotter J. M. (2002). A structural analysis of the Cardington British steel corner test. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(4), 427-442. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00066-9)
13. Jiang, L., Orabi, M. A., Jiang, J., & Usmani, A. (2021). Modelling concrete slabs subjected to fires using nonlinear layered shell elements and concrete damage-plasticity material. *Engineering Structures*, 234, Article 111977. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111977>
14. Qiu J., Jiang L. (2023). An integrated section model to enable simulating composite slabs in fire simply as modelling a flat slab. *Computers & Structures*, 289, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107180>
15. Адаменко В. Розвиток методів розрахунку і конструювання сталевих будівель і споруд: від Ейфелевої вежі до національного стадіону Сінгапурського спортивного комплексу. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2022. Вип.11. С. 32-43. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.32-43>
16. Adamenko V., Mavdiuk A. Дослідження впливу ефектів другого порядку на прикладі сталевого каркасу аеропорту. Містобудування та територіальне планування. 2020. Вип.72. С. 176-186. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.72.176-186>
17. Tao, Z., Wang, Z., & Yu, Q. (2013). Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 89, 121-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2013.07.001>

18. Ouyang, Y., Kwan, A.K., Lo, S.H., & Ho, J.C. (2017). Finite element analysis of concrete-filled steel tube (CFST) columns with circular sections under eccentric load. *Engineering Structures*, 148, 387-398. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.06.064>
19. Nikolić J., Kostić S. M., Stošić S. (2023). Numerical modelling of concrete-filled steel tubular short columns under axial compression. *Building Materials and Structures*, 66, 2300004N. DOI: <https://doi.org/10.5937/GRMK2300004N>
20. Sarir, P., Jiang, H., Asteris, P.G., Formisano, A. & Armaghani, D.J. (2022). Iterative Finite Element Analysis of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression. *Buildings*, 12, 2071. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12122071>
21. Bryde D., Broquetas M., Volm J. M. (2013). The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971-980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
22. Volk, R., Stengel, J. & Schultmann, F. (2014). Building Information Models (BIM) for existing buildings – literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, pp.109-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
23. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O. & Raahemifar K. (2017). Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1046-1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>
24. Адаменко В., Романишен О. Реалізація принципів будівельного інформаційного моделювання (BIM) та інформаційних технологій розрахунку при проектуванні залізобетонних і сталезалізобетонних каркасних будівель. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2023. Вип.13. С. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.51-61>
25. Адаменко В. Досвід впровадження BIM-технологій в навчальний процес на кафедрі металевих і дерев'яних конструкцій КНУБА. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2022. Вип.10. С. 66–78. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.66-78>
26. Visintini, D., Marcon, E., Pantó, G., Canevese, E.P., Gottardo, T.D., & Bertani, I. (2019). Advanced 3d modeling versus building information modeling: the case study of Palazzo Ettoreo in Sacile (Italy). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1137-2019>
27. Hui W., Xu H., Li Z. & Ma C. (2019). Parametric Design and Application of Assembled Steel Plate Composite Beam Bridge Based on BIM Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 371(2), 022074. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/371/2/022074>
28. Tang J., Lu W., Fu D., Geng L., Luo W. (2022). Study on new joint connection scheme of steel reinforced concrete composite structure. *International Conference on Electronic Information Engineering, Big Data, and Computer Technology (EIBDCT 2022)*, 122563A. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2636776>
29. Eleftheriadis, S., Duffour, P., Stephenson, B., & Mumovic, D. (2018). Automated specification of steel reinforcement to support the optimisation of RC floors. *Automation in Construction*, 96, 366–377. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.005>
30. Mangal M., Cheng J. C. P. (2018). Automated optimization of steel reinforcement in RC building frames using building information modeling and hybrid genetic algorithm. *Automation in Construction*, 90, 39-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.013>

References

1. Earij, A. Alfano, G., Cashell, K., & Zhou, X. (2017). Nonlinear three-dimensional finite-element modelling of reinforced-concrete beams: Computational challenges and experimental validation. *Engineering Failure Analysis*, 82, 92-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.025>
2. Mykhalevskiy N. A., Vegera P. I., Blikharskyi Z. Y. (2023). Analysis of the effect of uneven damage of reinforced concrete beam using the FEMAP software package. *Modern construction and architecture*, 6, 54-61. DOI: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-54-61>
3. Swoo-Heon Lee, Ali Abolmaali, Kyung-Jae Shin, Hee-Du Lee. (2020). ABAQUS modeling for post-tensioned reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering*, 30, Article 101273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101273>

4. Moreira L. S., Sousa J. B. M., Parente E. (2018). Nonlinear finite element simulation of unbonded prestressed concrete beams, *Engineering Structures*, 170, 167-177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.077>
5. Mikula J., Szolomicki J. (2019). Numerical modelling of RC floor slabs. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 586, Article 012031, DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/586/1/012031>
6. Adamenko V. M. (2015). Metodyka eksperymentalnykh doslidzhen deformovanoho stanu monolitnoho rebrystoho perekryttia sylosu. [Methodology of experimental studies of the deformed state of the monolithic ribbed slabs of the silo]. *Urban development and spatial planning*, 55, 9-13. [in Ukrainian].
7. Adamenko V. M. (2015). Chyselne modeliuvannya napruzhenno-deformovanoho stanu monolitnoho rebrystoho perekryttia sylosu. [Numerical modeling of the stress-strain state of the monolithic ribbed slabs of the silo]. *Bases and Foundations*, 36, 48-56. [in Ukrainian].
8. Azizov T. N., Pereiras R. (2023). Do rozrakhunku zalizobetonnykh plyt metodom skinchenykh elementiv. [For the calculation of reinforced concrete slabs using the finite element method]. *Resource-saving materials, structures, buildings and structures*, 43, 85-92. DOI: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i43.10> [in Ukrainian].
9. Recalde, B. R. B., Gastal, F. P. S. L., Bessa, V. R. D., & Schwetz, P. F. (2015). Numerical analysis of waffle slabs in flexure considering the effects of concrete cracking. *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais*, 8(2), 225–247. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000200009>
10. Li Z, Ding F, Cheng S. (2021). Numerical investigation on moment redistribution of continuous reinforced concrete beams under local fire conditions. *Advances in Structural Engineering*, 24(15), 3375-3388. DOI: <https://doi.org/10.1177/13694332211026226>
11. Wang Y. C. (2000). An analysis of the global structural behaviour of the Cardington steel-framed building during the two BRE fire tests. *Engineering Structures*, 22(5), 401-412. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00127-8)
12. Gillie M., Usmani A. S., Rotter J. M. (2002). A structural analysis of the Cardington British steel corner test. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(4), 427-442. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00066-9)
13. Jiang, L., Orabi, M. A., Jiang, J., & Usmani, A. (2021). Modelling concrete slabs subjected to fires using nonlinear layered shell elements and concrete damage-plasticity material. *Engineering Structures*, 234, Article 111977. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111977>, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111977>
14. Qiu J., Jiang L. (2023). An integrated section model to enable simulating composite slabs in fire simply as modelling a flat slab. *Computers & Structures*, 289, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107180>
15. Adamenko V. (2022). Rozvytok metodiv rozrakhunku i konstruiuvannya stalevykh budivel i sporud: vid Eifelevoi vezhi do natsionalnoho stadionu Sinhapurskoho sportyvnoho kompleksu. [Development of calculation and detailing methods of steel buildings: From the Eiffel tower to the National stadium of Singapore sports hub]. *Building constructions. Theory and Practice*, 11, 32–43. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.32-43> [in Ukrainian].
16. Adamenko V., Mavdiuk A. (2020). Doslidzhennia vplyvu efektyv drugoho poriadku na prykladi stalevoho karkasu aeroportu. [Study of the influence of second order effects on the example of the steel frame of the airport]. *Urban development and spatial planning*, 72, 176–186. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.72.176-186> [in Ukrainian].
17. Tao, Z., Wang, Z., & Yu, Q. (2013). Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 89, 121-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2013.07.001>
18. Ouyang, Y., Kwan, A.K., Lo, S.H., & Ho, J.C. (2017). Finite element analysis of concrete-filled steel tube (CFST) columns with circular sections under eccentric load. *Engineering Structures*, 148, 387-398. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.06.064>
19. Nikolić J., Kostić S. M., Stošić S. (2023). Numerical modelling of concrete-filled steel tubular short columns under axial compression. *Building Materials and Structures*, 66, 2300004N. DOI: <https://doi.org/10.5937/GRMK2300004N>

20. Sarir, P., Jiang, H., Asteris, P.G., Formisano, A. & Armaghani, D.J. (2022). Iterative Finite Element Analysis of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression. *Buildings*, 12, 2071. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12122071>
21. Bryde D., Broquetas M., Volm J. M. (2013). The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971-980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
22. Volk, R., Stengel, J. & Schultmann, F. (2014). Building Information Models (BIM) for existing buildings – literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, pp.109-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
23. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O. & Raahemifar K. (2017). Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1046-1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>
24. Adamenko V., Romanyshen O. (2023). Realizatsiia pryntsyviv budivelnoho informatsiinoho modeliuвання (BIM) ta informatsiinykh tekhnolohii rozrakhunku pry proiektuvanni zalizobetonnykh i stalezalizobetonnykh karkasnykh budivel. [Implementation of building information modeling (BIM) principles and information technologies for structural analysis in the design of reinforced concrete and composite steel-reinforced concrete framed buildings]. *Building constructions. Theory and Practice*, 13, 51–61. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.51-61> [in Ukrainian].
25. Adamenko V. (2022). Dosvid vprovadzhenia BIM-tekhnolohii v navchalnyi protses na kafedri metalevykh i derevianykh konstruksii KNUBA. [Experience of implementing BIM technologies in the educational process at the department of steel and timber structures of KNUCA]. *Building constructions. Theory and Practice*, 10, 66–78. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.66-78> [in Ukrainian].
26. Visintini, D., Marcon, E., Pantó, G., Canevese, E.P., Gottardo, T.D., & Bertani, I. (2019). Advanced 3d modeling versus building information modeling: the case study of Palazzo Ettoreo in Sacile (Italy). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1137-2019>
27. Hui W., Xu H., Li Z. & Ma C. (2019). Parametric Design and Application of Assembled Steel Plate Composite Beam Bridge Based on BIM Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 371(2), 022074. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/371/2/022074>
28. Tang J., Lu W., Fu D., Geng L., Luo W. (2022). Study on new joint connection scheme of steel reinforced concrete composite structure. *International Conference on Electronic Information Engineering, Big Data, and Computer Technology (EIBDCT 2022)*, 122563A. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2636776>
29. Eleftheriadis, S., Duffour, P., Stephenson, B., & Mumovic, D. (2018). Automated specification of steel reinforcement to support the optimisation of RC floors. *Automation in Construction*, 96, 366–377. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.005>
30. Mangal M., Cheng J. C. P. (2018). Automated optimization of steel reinforcement in RC building frames using building information modeling and hybrid genetic algorithm. *Automation in Construction*, 90, 39-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.013>

Адаменко Вячеслав Миколайович

Київський національний університет будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна
vchsvet@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7469-9585

Дзюбко Дмитро Андрійович

магістр
dziubkodmytro@gmail.com

ORCID: 0009-0000-4003-6161

Романишен Олег Віталійович

Київський національний університет будівництва та архітектури,
магістр
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна

olegromanyshen@gmail.com
ORCID: 0009-0001-0925-8329

Для посилань:

Адаменко В. М., Дзюбко Д. А., Романишен О. В. Дослідження напружено-деформованого стану вузлів сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель за допомогою інформаційних технологій розрахунку та будівельного інформаційного моделювання. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. № 1. С. 107–123.

For references:

V. Adamenko, D. Dziubko, O. Romanyshen. (2024). Stress-strain state investigation of nodes of composite steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings using information technology for structural analysis and building information modeling. Mechanics and Mathematical Methods. VI (1). 107–123.