

## БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

УДК 697.85

## МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДСИЛЕННЯ ДИМОВОЇ ТРУБИ ВИСОТОЮ 150 М ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Попов В. О., Білоус О. О., Власко А. А.

У статті розглянуто основи моделювання металоконструкцій підсилення димової бапти-труби, що, внаслідок комплексної реконструкції, перетворюється у зовнішній залізобетонний каркас для внутрішнього газовідводного трубчастого осердя, виготовленого з композиційних матеріалів; удосконалено метод моделювання напружено-деформованого стану комбінованих сталобетонних систем під дією кліматичних та динамічних сейсмічних навантажень. Засобами програмного комплексу "SCAD" розроблена скінчено-елементна модель димової труби після підсилення, вивлено найбільш небезпечні ділянки конструкції, які локалізовані в рівні нижнього опорного перекриття; запропоновано конструктивні рекомендації з підвищення надійності будівельних конструкцій підсилення та технологічні заходи, що зменшують ймовірність появи аварійної ситуації.

**Ключові слова:** димова труба з монолітного залізобетону, полімер-композиційні матеріали, скінчено-елементна модель, оптимізація конструкцій.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ УСИЛЕНИЯ ДЫМОВЫХ ТРУБ ВЫСОТОЙ 150 М ДЛЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Попов В. А., Белоус А. А., Власко А. А.

В статье рассмотрены основы моделирования металлических конструкций усиления дымовой бапти-трубы, которая, вследствие комплексной реконструкции, превращается во внешний железобетонный каркас для внутреннего газоотводящего трубчатого сердечника, изготовленного из композиционных материалов; усовершенствован метод моделирования напряженно-деформированного состояния комбинированных сталобетонных систем под действием климатических и динамических сейсмических нагрузок. Средствами программного комплекса "SCAD" разработана конечно-элементная модель дымовой трубы после усиления, выявлены наиболее опасные участки конструкции, которые локализованы в уровне нижнего опорного перекрытия; предложены конструктивные рекомендации повышения надежности строительных конструкций усиления и технологические мероприятия для снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций.

**Ключевые слова:** дымовая труба из монолитного железобетона, полимер-композиционные материалы, конечно-элементная модель, оптимизация конструкций.

## THE MODELING OF STRESS-CONDITION OF STRENGTHENING ELEMENTS OF 150 M HEIGHT CHIMNEY TO OPTIMIZATION ITS STRUCTURAL DESIGN

V. Popov, O. Bylous, A. Vlasko

In this article have been examine principles of modeling the metal construction of chimney's strengthening which in consequence of all-round reconstruction transformes into outside reinforced concrete frame for inside vents composition core; have been impruved method of modelling of tensely-stress condition of steel-aggregate concrete system under the climatic and dynamic seismic forces. Have been done super-elements model of strengthened chimney on PC programs SCAD, have been localized strongly strained fragments of construction which take position on the low bearing level; have been offered structural recommendations to the reliabilities enlargement of the structural elements and technological measures to the lowering of probability of emergency situations.

**Keywords:** monolithic concrete chimney, compounded plastic material, super-elements model, optimization of construction.

## Вступ

На сьогодні в Україні, як і у багатьох інших країнах колишнього СРСР, постала гостра проблема, пов'язана з економією енергетичних ресурсів. Великі підприємства, особливо хімічної, металургічної та теплогенеруючої промисловості в умовах значного здорожчання нафтопродуктів та природного газу і, водночас, зростаючої конкуренції, вимушені впроваджувати інноваційні технології, що, в кінцевому випадку, призводить до енергозбереження і, відповідно, до здешевлення вартості виробленого продукту.

Для прикладу, вартість сучасних мінеральних добрив, що синтезуються за високих температурних режимів на підприємствах хімічної промисловості на 90-95% залежить від вартості природного газу. Енергія, що витрачається на нагрівання реакторів, може бути використана для вторинного обігріву, наприклад, систем тепlopостачання відпрацьованими димовими газами. Таким чином, за рахунок використання вторинного тепла, збільшується загальна ефективність переробних процесів. Однак при цьому виникає ціла низка супутніх проблем, пов'язаних із відведенням токсичних продуктів згорання у атмосферу.

По-перше, оскільки після впровадження заходів з енергозбереження, пічні димові гази віддають тепло системам тепlopостачання, вони мають значно нижчу температуру за проектну. По-друге, загальна кількість вироблених на підприємствах хімічної промисловості продукції, через конкурентну боротьбу, невинно падає, що, в кінцевому випадку, призводить не тільки до меншого споживання енергоносіїв, а і до зменшення тиску пічних газів. Як наслідок тіло залізобетонних чи цегляних димових труб, що виконують несучу та огорожуючу функцію прогривається не достатньо. В холодний період року на трубах активно утворюється конденсат, крижані брили, а сам залізобетон через позаштатне часте замороження-відтаювання руйнується. Крім того, внаслідок вказаних процесів зменшується висота виносу шкідливих пічних газів, що може негативно вплинути на стан навколишнього середовища.

Таким чином для використання існуючих димовідвідних труб з монолітного залізобетону, що на цей час є переважаючими по кількості в Україні в висотному діапазоні більше 90 м [1, с. 21], слід передбачити технологічні заходи зі збільшення тиску пічних газів.

Одним з методів рішення проблем, пов'язаних із димовими пічними газами в умовах економії енергетичних ресурсів є розділення димовідвідних та несучих функцій залізобетонних пічних труб [1 – 3]. У [1, с. 163] рекомендується всередині існуючих залізобетонних конічних конструкцій влаштувати коаксіальні склопластикові газоходи, діаметр яких буде менший за діаметр залізобетонної конструкції. Отримана конструкція «труба в трубі» (рис. 1) має чітко розділені за функціями частини: внутрішній газовідвідний ствол зі склопластику, що закріплений до зовнішнього залізобетонного остову, який, окрім власної ваги та ваги газоходів сприймає кліматичні впливи. Для ефективної роботи подібних модернізованих конструкцій слід забезпечити значний технологічний зазор між склопластиковим осердям та зовнішніми конструкціями, який має бути експлуатованим [1, с. 164].

Склопластикові конструкції можуть витримувати гази температурою до +130°C на звичайних в'язучих та до +180°C – на термостійких в'язучих.

Технологія зведення конструкцій коаксіального трубчастого склопластикового осердя всередині існуючих залізобетонних конструкцій пов'язана з використанням компактного монтажного обладнання у вигляді повзучих кранів та монтажних лебідок [2 – 4]. Секції газоходів по чергово подають у димову трубу та закріплюють до залізобетонних стінок. Закріплення рекомендується здійснювати шляхом підвішування елементів осердя до раніше змонтованих металевих площадок, які, в свою чергу, кріпляться до залізобетонної труби [1, с. 176].

Питаннями розроблення ефективних конструктивних рішень реконструкції монолітних залізобетонних димових труб, їх моделюванням та оптимізацією на цей час займаються такі відомі інженери і вчені В. М. Асташкін, Ф. П. Дужих, В. С. Жолудов, О. З. Корсунський, Є. В. Субботин, С. В. Сатьянов, Є. В. Малютин, Б. Б. Спорихін [1–4]. У їх роботах описані методики конструювання ефективних димовідвідних труб в умовах енергозбереження. Однак на цей час не достатньо вивченими залишаються питання оптимізації конструктивних рішень металоконструкцій підсилення, що використовуються при реконструкції.

## Постановка проблеми

Мета роботи – на підставі раціональних компоувальних схем модернізації залізобетонних димовідвідних труб, розроблених ПСФ «Енерго» (Москва) із впровадженням новітніх технологій

виготовлення склопластикових газоходів ВАТ «Авангард» (Смоленська область, Російська Федерація) розробити модель металоконструкцій димової труби висотою до 200 м в умовах кліматичної зони України. Шляхом послідовного перебору невіддільних станів, включаючи сейсмічні впливи, встановити раціональні конструктивні форми елементів підсилення та локалізувати оптимальні місця їх розташування. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати комплекс задач: розробити методику моделювання кліматичних, технологічних та аварійних впливів, що виникають у димовій трубі після реконструкції; дослідити стійкість від перекидання залізобетонного остову в умовах значного зменшення ваги конструктивних елементів при дії ураганного вітру та при землетрусах; розробити економічне конструктивне рішення конструкцій підсилення, яке б гарантувало надійність та функціональність модернізованої труби; розробити конструктивні та експлуатаційні рекомендації підсиленої димової труби.

### Основна частина

Поставлені у роботі задачі було вирішено на прикладі існуючої димової труби висотою 150 м, яка зведена на території ПАТ «Одеський припортовий завод» у м. Южне. Конструктивне рішення залізобетонних та інших будівельних конструкцій димової труби наведено на рис. 1. Згідно з [1, с. 22-37] основою для будівельних конструкцій служить плитний фундамент, що заглиблений у ґрунт на глибину достатню для забезпечення загальної стійкості споруди. На плитний фундамент обирається тонкостінний залізобетонний трубчастий каркас у вигляді зрізаного конуса, на внутрішній поверхні якого влаштовано консолі, що підтримують теплозахисну обшивку з вогнетривкої цегли, яку називають футеровкою. Ззовні на тілі залізобетонного остову влаштовано закладні деталі, до яких прикріплюються металоконструкції сервісних та світофорних площадок. Доступ до площадок забезпечується металевими драбинами.

В найбільш негативних умовах працює оголовок, що знаходиться в безпосередній зоні охоплення гарячими, агресивними димовими газами та піддається температурним впливам.

Конструкція димової труби має блискавкозахист та кольорове і світлове сигнальне огороження. В процесі реконструкції димової труби всередині існуючого залізобетонного остову зводиться газовідвідний стовп зі склопластика, що підвішується, встановлюється та розкріплюється на заздалегідь змонтованих всередині труби металевих балочних конструкціях (рис. 1). Після реконструкції димова труба являє собою систему, яка складається з конструкцій:

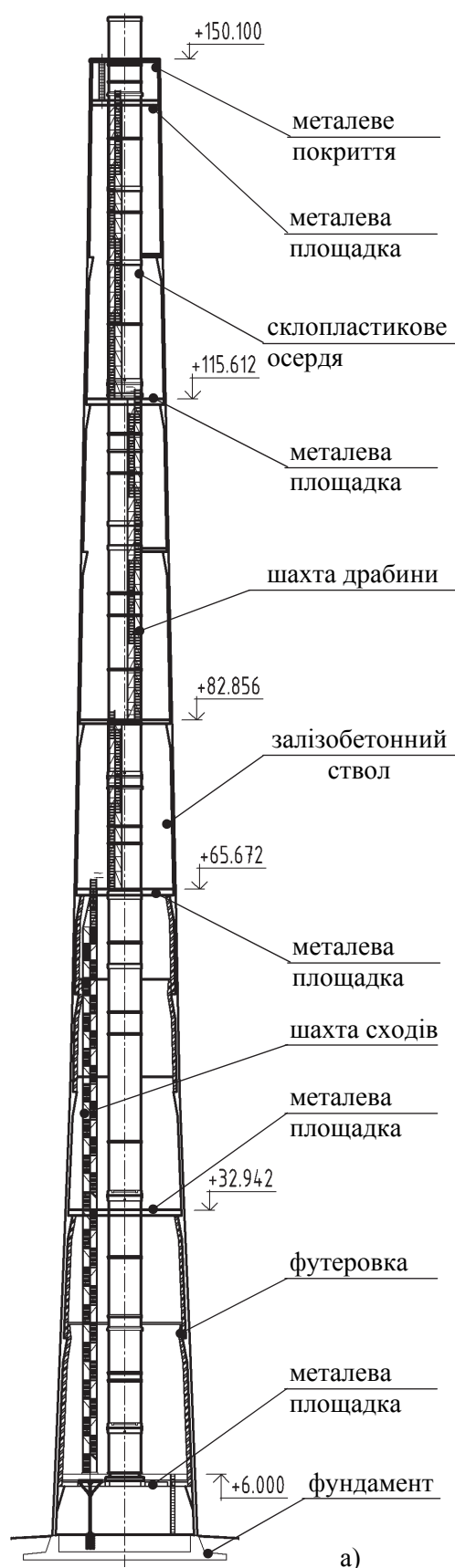
- існуючої залізобетонної димової труби, яка перетворюється в зовнішній остов-оболонку, що повинна сприймати виключно зовнішні кліматичні та сейсмічні впливи. Елементи футерівки при цьому частково чи повністю демонтуються;
- циліндричного склопластикового осердя діаметром близько 3 м, що підвішується до залізобетонної оболонки та виконує функцію димовідведення із сприйняттям агресивного хімічного і температурного впливу пічних газів;
- металоконструкцій підсилення, які складаються з горизонтальних майданчиків, з допомогою яких циліндричне склопластикове осердя зв'язується із існуючою залізобетонною оболонкою та системи сходів, які зв'язують майданчики між собою.

Оціночний розрахунок залізобетонного остову, з врахуванням вимог норм [5 – 8, 12] показує, що його вага з врахуванням понижаючого коефіцієнту 0,9 після розбирання футерівки не перевищує 3 100 т, оціночна вага металоконструкцій підсилення буде складати близько 100 т. Вага склопластикових конструкцій не перевищує 50 т. Отже, загальний стабілізуючий момент, який утримує димову трубу від перекидання під дією комплексу горизонтальних впливів від сейсміки та вітру, розрахований за методикою, наведеною у [11] складатиме близько 280 кН·м.

Водночас, загальний перекидний момент, який може впливати на конструкції димової труби після реконструкції від впливу сейсміки не перевищує 100 кН·м. Ще менше значення перекидного моменту при впливі горизонтальної складової вітрового навантаження.

Таким чином, після реконструкції внаслідок зменшення загальної ваги конструкцій димової труби коефіцієнт запасу стійкості при сейсмічному впливі зростає та досягає не менше як 2,5 – кратного значення. Зменшення коефіцієнту запасу стійкості при вітровому впливі в умовах сейсмонезбезпечних зон не впливає на загальний стан споруди.

Моделювання металоконструкцій, які монтуються всередині каркасу, методом скінчених елементів засобами програмного комплексу SCAD [9], та аналіз напружено-деформованого стану проєктованих конструкцій, доводить надійність та ефективність пропонованих конструктивних рішень підсилення.



б)



в)

Рисунок 1 – Конструктивний розріз димової труби після влаштування склопластикового осердя: а – конструктивне рішення, б – подача однієї з секцій склопластикового осердя до монтажного отвору у стінці димової труби, в – монтаж металокаркасу маршевих сходів.

Найбільш навантаженим елементом розглядуваної системи є комбіноване сталобетонне перекриття (рис. 3,а), яке, частково, складається зі старих будівельних залізобетонних конструкцій та металевих елементів підсилення. Цю частину споруди рекомендується додатково підкріплювати розвантажуючими опорними стійками (рис. 3,б).

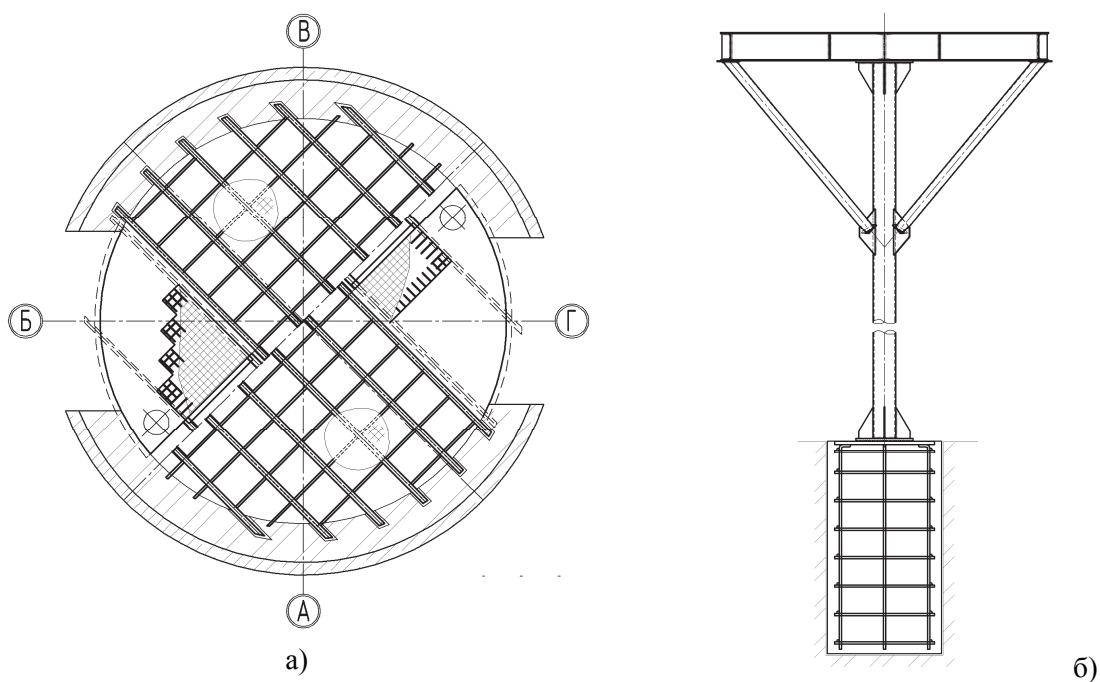


Рисунок 3 – Концептуальне рішення підсилення: а – принципове рішення підсилення перекриття залізобетонної димової труби в рівні встановлення газоходів на позн. ~ 6 м; б – розподільча стійка-підпірка під перекриттям в зоні встановлення шахти маршевих сходів; в – підсилені металоконструкції найбільш навантаженого перекриття

Проблемним є влаштування фундаментів для опорних стійок всередині існуючих конструкцій димової труби в стиснених умовах. Рекомендується влаштовувати пальові фундаменти у вигляді одиночної набивної палі-стійки, яка нижнім кінцем обпирається на плитний фундамент димової труби (рис. 3,б).

Статистична обробка можливих відказів будівельних конструкцій після підсилення показала, що ймовірними є подальший розвиток пошкоджень верхньої частини існуючої залізобетонної оболонки внаслідок погіршення стану тіла бетону, який зазнав значних втрат протягом тривалої експлуатації, не зважаючи на зменшення інтенсивності агресивного впливу в цій зоні. Для ізоляції проблемних поверхонь рекомендується заглушити простір між новим газовідводним стволом зі склопластику та існуючим залізобетонним скелетом металевою кришкою. Бокові поверхні, що межують з верхнім залізобетонним торцем труби, слід ізолювати фартухами з тонкостінної нержавіючої сталі. Зазори слід герметизувати пружно-піддатливими герметиками.

Оскільки показники лінійного видовження залізобетонних та склопластикових конструкцій мають суттєву відмінність, окрім цього, робоча температура нового композиційного осердя, особливо в зимовий період, на  $\sim 200^\circ$  вища за температуру несучих конструкцій, опорні конструкції осердя мають влаштовуватися в ковзних (в вертикальному напрямку) опорах.

Елементи маршевих сходів та драбини з умов транспортування раціонально виготовляти секційними (рис. 1,в). Елементи нових металевих перекриттів всередині димової труби, внаслідок значних розмірів в плані, неточності геометрії існуючих несучих та огорожуючих конструкцій, складнощів при монтажі в стиснених умовах на висоті слід виготовляти з окремих сегментів, які слід підрізати по місцю в монтажному положенні.

Важливим питанням при реконструкції димової труби є відновлення блискавкозахисту та влаштування заземлення для зняття статичної напруги, що виникає на склопластикових та металевих елементах внаслідок їх взаємодії з частинками пічних газів.

Узагальнивши сказане можна стверджувати, що вказані заходи суттєво підвищать надійність та довговічність димової труби, дозволять зменшити періодичність та вартість планових ремонтних робіт, покращать екологічну ситуацію в регіоні внаслідок більш ефективного розсіювання токсичних димових газів.

### Висновки

В результаті проведених досліджень моделей напружено-деформованого стану надземної та підземної частини підсиленої внаслідок комплексної реконструкції димової труби, можна зробити такі висновки:

- розроблена модель напружено-деформованого стану залізобетонної димової труби висотою 150 м після модернізації, яка складається з зовнішнього залізобетонного остову, внутрішнього склопластикового газоходу та металевих конструкцій, які служать для підтримання газоходів у проектному положенні та його сервісного обслуговування;
- виявлено, що для конструкцій такого типу найбільш невідгідним сполученням навантажень є аварійний стан, який виникає внаслідок сейсмічних впливів;
- шляхом модельних досліджень виявлено, що коефіцієнт запасу загальної стійкості рівноваги будівельних конструкцій димової труби внаслідок зменшення загальної ваги споруди через розбирання футерівки при сейсмічних впливах збільшується;
- зменшення коефіцієнту запасу загальної стійкості споруди при впливі ураганного вітру не є критичним фактором у порівнянні із сейсмікою;
- локалізовані найбільш небезпечні ділянки будівельних конструкцій димової труби, якими виявилися залізобетонні перекриття першого ярусу в рівні  $\sim 6$  м, які сприймають навантаження від металевої башти, що підтримує систему сходів. Рекомендоване підсилення цих перекриттів полягає у влаштуванні розвантажуючих металевих балочних систем та додаткових стійок;
- рекомендованим рішенням фундаментів під розвантажуючі стійки є буронабивні одиночні залізобетонні палі, які обпираються на верхній обріз існуючих плитних фундаментів;
- оптимізовано конструктивне рішення металевої башти маршевих сходів шляхом розділення на секції з умов транспортування.

### Використана література

1. Дымовые трубы: традиции и инновации: монография / В. М. Асташкин, В. С. Жолудов, А.З. Корсунский и др.; под ред. д-ра техн. наук, проф. В. М. Асташкина и канд. техн. наук А. З. Корсунского. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 496 с.
2. Дужих Ф.П. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы: Справочное издание /

- Ф.П. Дужих, В.П. Осоловский, М.Г. Ладыгичев; под ред. Ф.П. Дужих. – М.: Теплотехник, 2004.
3. Дымовые трубы / А.М. Ельшин, М.Н. Ижорин, В.С. Жолудов, Е.Г. Овчаренко; под ред. С.В. Сатьянова. – М.: Стройиздат, 2001.
  4. Субботин Е. В. Современные подходы к эксплуатации, надзору и ремонту дымовых труб / Е.В. Субботин, В.А. Пазушан, В.М. Асташкин // Проблемы эксплуатации и оценка технического состояния строительных промышленных фондов, отработавших установленные сроки: науч.-инф. сб. № 1 / Научно-промышленный консорциум «Ресурс». – Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2002.
  5. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. На заміну розділу 10 СНиП 2.01.07-85. [Чинний від 2007-01-01] – К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с. – (Національний стандарт України).
  6. Навантаження і впливи. Норми проектування. ДБН В.1.2-:2006. [На заміну СНиП 2.01.07-85 (крім розділу 10)]. [Чинний від 2007-01-01] – К.: Мінбуд України, 2006. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).
  7. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. ДБН В.1.2-14-2009. [На заміну ГОСТ 27751, СТ СЭВ 3972-83, СТ СЭВ 3973-83, СТ СЭВ 4868-84]. [Чинний від 2009-12-01] – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с.
  8. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. ДБН В.2.6-163:2010. [На заміну СНиП II-23-81\*, окрім розділів 15\*-19]. [Остаточна редакція. Дата надання чинності 01.12.2011 р.] – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 202 с.
  9. Карпиловский В.С. Вычислительный комплекс SCAD: В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, А.В. Перельмутер та ін. – М.: Издательство АСВ; 2004 г. - 592 с.
  10. Общие правила проектирования стальных конструкций: СП 53-102-204 / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 2005. – 131 с.
  11. Попов В.О. Безфундаментні башти-атракціони з високоточним стовбуром. Монографія / В.О. Попов, І.П. Кондратенко, А.П. Ращепкін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 208 с.
  12. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України. ДБН В.1.1.12:2006. Введ. з 2 січня 2007 р. на заміну СНиП II-7-81\*. К.: Мінбуд України, 2006. – 77 с.

**Попов Володимир Олексійович** – к.т.н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету.

**Білоус Оксана Олександрівна** – магістрант факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання Вінницького національного технічного університету.

**Власко Анна Анатоліївна** – магістрант факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання Вінницького національного технічного університету.

**Попов Владимир Алексеевич** – к.т.н., доцент кафедри промислового і громадянського будівництва Вінницького національного технічного університету.

**Белоус Оксана Александровна** – магістрант факультету будівництва, теплоенергетики і газоснабження Вінницького національного технічного університету.

**Власко Анна Анатольевна** – магістрант факультету будівництва, теплоенергетики і газоснабження Вінницького національного технічного університету.

**Popov Volodymyr** – Ph.D, assistant professor of Industrial and Civil Engineerings Department, Vinnitsia National Technical University.

**Bylous Oksana** – undergraduate of faculty of buildings, power system and gas supply Vinnitsia National Technical University.

**Vlasko Anna** – undergraduate of faculty of buildings, power system and gas supply Vinnitsia National Technical University.