

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

УДК 624.01:621.313.1

МОДЕЛЮВАННЯ ОПОРИ ВІТРОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

В. О. Попов, В. М. Шишко, О. Л. Жбанкова, О. О. Вальков

У статті удосконалено метод моделювання напружено-деформованого стану металевих стержневих опор вітрогенераторних установок з вертикально розташованим широколопатевим ротором під дією динамічних навантажень, що виникають при експлуатаційних та аварійних ситуаціях. Засобами програмного комплексу "SCAD", "Lira" розроблена скінчено-елементна модель опори під дією кліматичних та технологічних динамічних навантажень, детально вивчено стан конструкцій опори вітрогенератора при відриві однієї та декількох лопатей, заклинюванні валу турбіни; локалізовано найбільш навантажені ділянки опори; запропоновано конструктивні рекомендації з підвищення надійності будівельних металоконструкцій вітрогенератора та технологічні заходи, що зменшують ймовірність появи аварійної ситуації.

Ключові слова: динамічні навантаження, вітрогенераторна установка, скінчено-елементна модель, оптимізація конструкцій.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПОРЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В. О. Попов, В. М. Шишко, А. Л. Жбанкова, А. А. Вальков

В статье усовершенствован метод моделирования напряженно-деформированного состояния металлических стержневых опор ветрогенераторных установок с вертикально расположенным широколопастным ротором под действием динамических нагрузок, возникающих при эксплуатационных и аварийных ситуациях. Средствами программных комплексов "SCAD", "Lira" разработана конечно-элементная модель опоры под действием климатических и технологических динамических нагрузок, детально изучено состояние конструкций опоры ветрогенератора в случае отрыва одной или нескольких лопастей и заклинивании вала турбины; локализованы наиболее нагруженные участки опоры; предложены конструктивные рекомендации для повышения надежности строительных металлоконструкций ветрогенератора и технологические мероприятия для снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: динамические нагрузки, ветрогенераторная установка, конечно-элементная модель, оптимизация конструкций.

THE MODELING OF STRESS-CONDITION OF WIND TURBINE ELECTRO-GENERATOR POWER-PLANT TO OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION

V. Popov, V. Shishko, O. Zbankova, O. Valkov

In this article have been modernized the method of modeling the tensely-strained condition of metallic rods bearing of wind turbine electro-generator power-plant under the dynamic loads from operation and emergency-stress situations. Have been done super-elements model of metal bearing on PC programs SCAD and Lira under the climatic and technological dynamic forces, have been studied in detail the stress-condition of metal generator's bearing in an accident of vanes destruction and jamming of generator's axles; have been localized strongly strained fragments of metal bearing; have been offered structural recommendations to the reliabilities enlargement of metal constructions of wind turbine electro-generator power-plant and have been offered the technological measures to the lowering of probability of emergency situations.

Keywords: dynamic loads, wind turbine electro-generator power-plant, super-elements model, optimization of construction.

Вступ

В Україні, як і у багатьох інших промислових країнах світу, постала гостра проблема, пов'язана з нестачею енергетичних ресурсів. Одним з варіантів подолання небезпечної нафто-газової залежності є розширення області використання відновлювальних джерел енергії, а саме, енергії сонця, вітру, припливно-відливних коливань, річкових та морських течій тощо. Однак промислове використання цих ресурсів обмежене технологічною складністю пристроїв-перетворювачів, їх дороговизною. В окремих розвинутих країнах, доля відновлювальних ресурсів досягає 30 % від рівня загального споживання енергії, однак в цілому для світової енергетики ця частка менша 3 %.

Яскравим прикладом ефективного використання відновлювальних джерел енергії є вітрогенераторні установки. На цей час в Україні ці пристрої використовуються в приморських районах з сильними постійними вітрами, особливо в Одеській, Миколаївській, Херсонській областях та у АР Крим. Конструктивні рішення вітрогенераторів не відрізняються різноманіттям конструктивних форм. Переважна більшість з них являє собою систему, яка складається з горизонтально розташованої турбіни на вертикальній трубчастій суцільнометалевій стійці, що приводиться у рух за допомогою гвинта, лопаті якого обертаються у вертикальній площині. Турбіна або стаціонарно орієнтована за переважаючим напрямком вітру, або може змінювати розташування осі гвинта для уловлювання максимальної кількості вітрового потоку. Електрична енергія, вироблена турбіною, накопичується у акумуляторній станції з якої здійснюється відбір енергії споживачами.

Вітрогенератори з горизонтально розташованим ротором володіють низкою недоліків, а саме: необхідність постійного орієнтування гвинта турбіни по вітровому потоку; значна, іноді, надзвукова, швидкість руху кінців видовжених лопатів гвинта та, пов'язані з цим, шумові явища; необхідність балансування робочої частини турбіни; великі перевитрати матеріалів на трубчасту опору необхідної міцності і жорсткості через значний рівень динамічних коливань системи з високо розташованим центром мас, технологічні складності, які виникають при виготовленні конічної труби опори. Цих недоліків позбавлені конструкції вітрогенераторів, ротор яких влаштовано вертикально. Гвинти цих пристроїв обертаються в горизонтальній площині, тому технічні складності, пов'язані з необхідністю орієнтування по вітру відпадає. Серед визнаних світових лідерів з виробництва вітрогенераторів такого типу слід відзначити фірми «Fairwind» (Китай), «Aeolos Wind Energy» (Данія), «En-Eco» (Італія), «UGE» (США), «Fortis» (Нідерланди).

Головною характеристикою вітрогенераторів є їх потужність у співвідношенні до висоти опорних конструкцій. Наприклад, для вітрогенераторів висотою близько 30 м середня розрахункова потужність від 20 до 60 кВт в залежності від принципу дії та виробника.

Питаннями розроблення ефективних металевих баштових опор для вітрогенераторних установок, їх моделюванням та оптимізацією в Україні займаються підприємства ТОВ «Енергостар» (м. Київ), ТОВ «Енергетична Альтернатива» (м. Харків), ДП «ВЕРАНО» (м. Одеса) та відомі вчені А. В. Перельмутер, Є. В. Шевченко, М. А. Микитаренко [3, 4, 9, 12]. У роботах цих науковців описані методики розрахунку баштових опор під дією статичних і динамічних впливів від вітру в основному в нормальному (експлуатаційному) стані. Не достатньо вивченими є питання аварійних ситуацій. В цій роботі розглянуто принципи будови опор для вітрогенераторних систем з вертикальним ротором.

Постановка проблеми

Мета роботи – розробити модель опори вітрогенераторної установки з горизонтально розташованим ротором з широкими лопатями, оцінити інтенсивність технологічних впливів при нормальній роботі та аварійних ситуаціях – заклинюванні валу ротора, відриві однієї чи декількох лопатів. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати комплекс задач, наведених нижче:

- розробити методику моделювання технологічних впливів від горизонтально розташованого ротору з лопатями;
- виконати моделювання надземної та підземної частин опори вітрогенераторної установки як просторової системи з врахуванням експлуатаційного стану та аварійних ситуацій;
- розробити методику моделювання аварійних станів;
- розробити економічне конструктивне рішення опори, яке б гарантувало міцність і стійкість вітрогенераторної установки, обрати раціональну систему розкідної гратчастої системи;
- розробити рекомендації з експлуатації установки, які б знизили ймовірність появи аварійних ситуацій.

Основна частина

Концептуальна ідея конструкції вітрогенератора з горизонтально розташованим широколопатовим ротором запропонована інженерами-фахівцями ТОВ «Енерговиріб», м. Вінниця (рис. 1, а). Споруда складається з металевої ґратчастої опори, зведеної на залізобетонних фундаментах, яка підтримує блок лопатів, що може обертатися в горизонтальній площині. В нижній частині опори влаштований генератор електричного струму. Співосно з опорою знизу до верху влаштовано вал з товстостінної труби, який передає крутильний момент від блоку лопатів (ротору) до генератору. В середині металевої опори в рівні технологічних майданчиків влаштовано підшипникові опори, які підтримують цей вал. Згідно з авторською ідеєю інженерів ТОВ «Енерговиріб» площа лопатів, що сприймають навантаження від вітру, розташована перпендикулярно вітровому потоку, тобто вертикально. Площа лопатів, що протидіють вітру, обертаючись навколо власної осі, займають найбільш вигідне, горизонтальне положення. В проміжному положенні лопаті, обертаючись навколо власної осі, нахилені до горизонту.

Об'єктом наукового дослідження є напружено-деформований стан будівельних конструкцій – металевої ґратчастої опори. Згідно з технічним завданням ТОВ «Енерговиріб» було змодельовано впливи від технологічних агрегатів, розміщених на вітрогенераторній установці. Виявлено, що в експлуатаційному стані металева стрижнева опора сприймає кліматичне навантаження від вітру, ожеледі та технологічні впливи від лопатевого ротору та підшипникових вузлів валу генератора.

Аналіз світового досвіду проектування і експлуатації вітрогенераторів довів, що на цей час найбільшою популярністю користуються системи середньої висоти (до 35 м). Тому в подальшому для побудови скінчено-елементної моделі конструкції прийнято вітрогенератор з висотою опорної частини – 30 м.

Шляхом статистичної обробки таблиці можливих відказів виявлено, що найбільш небезпечними, хоча і малоймовірними, є стани заклинювання центрального валу генератора, пошкодження (в найгіршому випадку, руйнування) однієї чи декількох лопатів ротора.

Аналіз моделі експлуатаційного стану і станів різноманітних аварій показав, що опора вітрогенераторної установки мусить мати компонувальні розміри, які б забезпечували стійкість ствола від закручування і, як наслідок, бути достатньо широкими у плані. Виявлено, що елементи опори доцільно виготовляти найменшої можливої ширини з оптимальними характеристиками, щодо обтікання вітровим потоком. Аварійні стани конструкції, пов'язані із значними перевантаженнями опорних елементів та ударними впливами уламків об опору, диктують необхідність використання ефективних ґратчастих систем, вихід з ладу одного з елементів якої не призводив би до геометричної змінюваності і, відповідно, нестабільності всієї системи.

Узагальнивши ці висновки було прийнято принципове інженерне рішення про виготовлення ствола опори вітрогенераторної установки у вигляді зрізаної піраміди, елементи решітки було вирішено конструювати з круглих товстостінних труб, розкісна система – хрестова, яка при руйнуванні одного з розкосів перетворювалася б на геометрично незмінювану розкісну трикутну. З умов транспортування ствол вітрогенератору вирішено виготовляти секційними, причому нижні секції – з окремих елементів, верхні – суцільнозварні. Для забезпечення просторової жорсткості та геометричної незмінюваності у верхівках секцій влаштовано діафрагми жорсткості, які суміщено з сервісними площадками (рис. 1, б).

Моделювання заклинювання валу ротору показує, що у цьому випадку весь накопичений крутильний момент передається на опору та мусить бути поглинута металевими стрижневими фермами. При ураганному вітрі в середньому приріст зусиль розтягу у поясах при цьому складає до 2 % (рис. 2, а, б), однак зусилля в розкісній системі, особливо в верхній секції, збільшуються у десятки разів (рис. 2, в, г). Збільшення перерізу розкосів для забезпечення міцності і жорсткості верхньої секції робить їх неспівставно великими у порівнянні з поясами.

Моделювання менш ймовірного стану пошкодження (чи повного руйнування) однієї чи декількох лопатей призводить до появи дебалансної сили, яка тим більша, чим більший ступінь пошкодження. Шляхом скінчено-елементного моделювання був змодельований динамічний вплив на будівельні конструкції вітрогенератору збоку розбалансованого пошкодженого ротора у якого зазнало пошкодженнь 1, 2 та 3 лопаті. Моделювання довело, що споруда раціональних конструктивних параметрів не може витримати динамічного дебалансного впливу разом із впливом на остов ураганного вітру через явище резонансу.

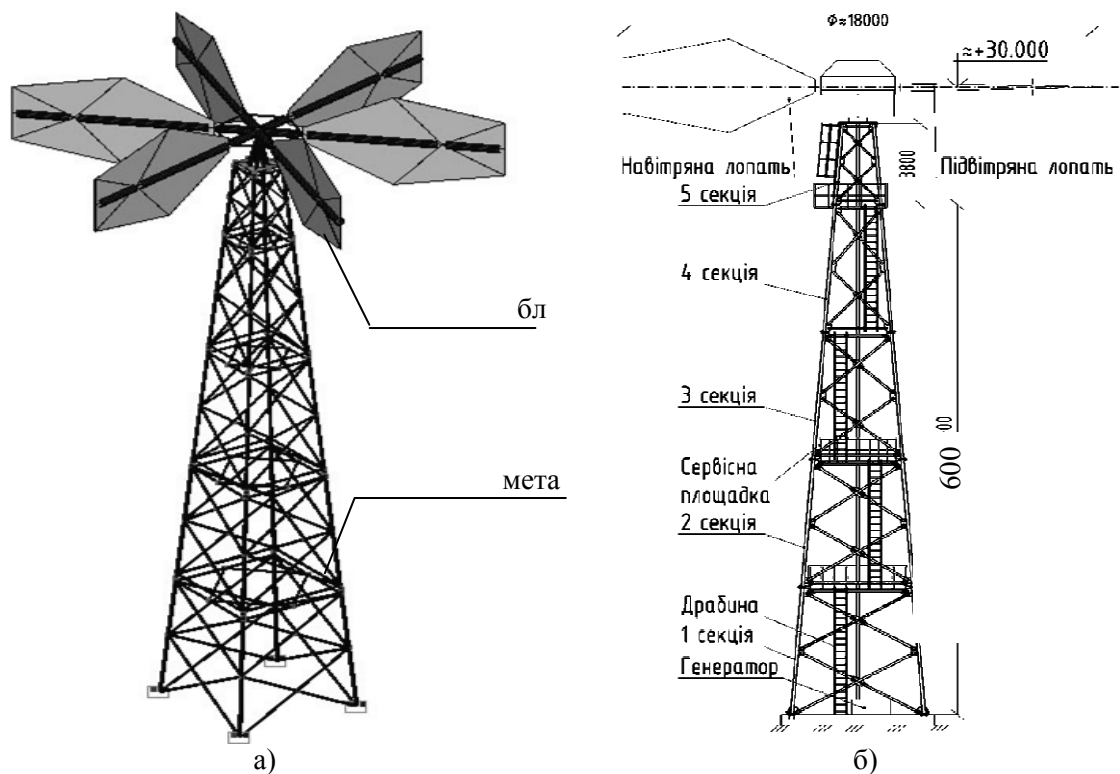


Рисунок 1 – Вітрогенераторна установка:

а – тривимірний модель, б – фрагмент складального креслення металокаркасу опори

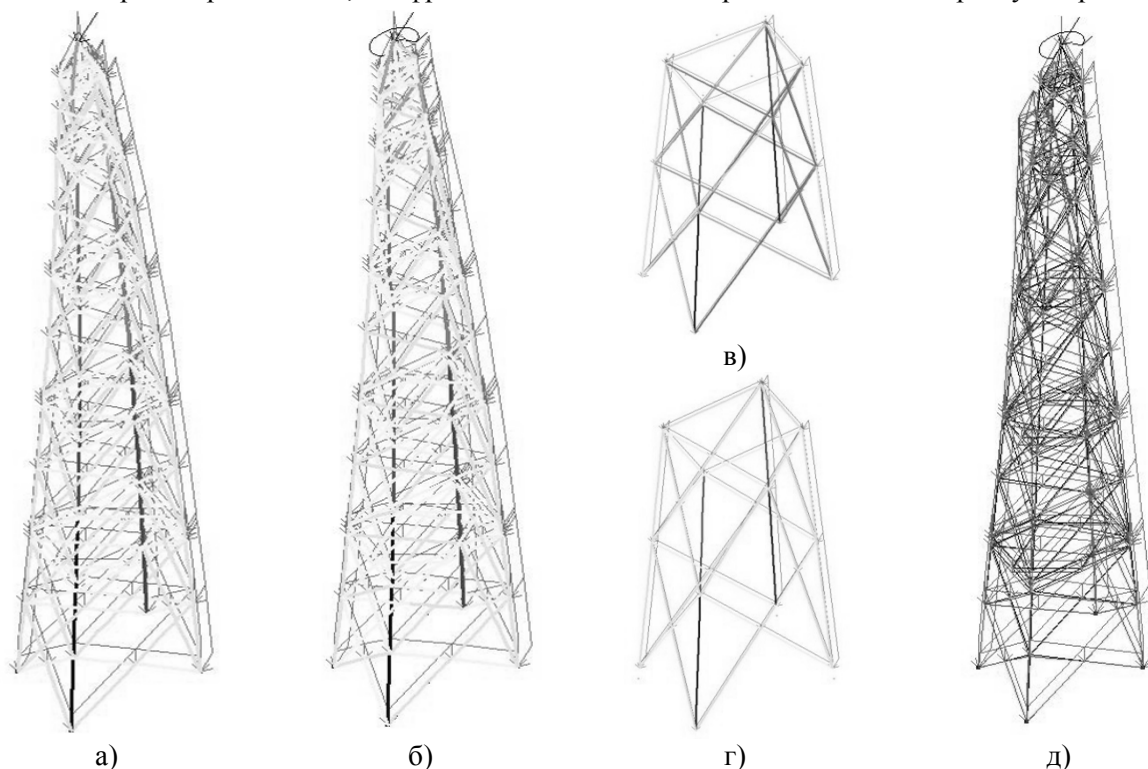


Рисунок 2 – Деформований стан конструкції опори вітрогенератору: а, в – при дії ураганного вітру та експлуатаційній роботі ротора; б, г, д – аварійний стан із заклинюванням валу генератора

Темними кольорами на перших двох схемах показані зусилля розтягу-стиску ~ 300-400 кН.

Таким чином умовами експлуатації слід зменшити ймовірність появи аварійних станів та передбачити сервісну площу навколо вітрогенераторної установки діаметром не менше 1,5 від висоти споруди.

Аналогічні дослідження було проведено і для підземної частини споруди.

Висновки

В результаті проведених досліджень моделей напружено-деформованого стану надземної та підземної частини вітрогенераторної установки з врахуванням експлуатаційного та аварійних станів, можна зробити такі висновки:

- розроблена модель опори унікальної вітрогенераторної установки з вертикально розташованим широколопатеvim ротором, яка враховує відцентрові та інерційні впливи;
- виявлено, що для конструкцій такого типу найбільш невідгідним сполученням навантажень є аварійний стан, з відривом однієї чи декількох лопатів, або ситуація, пов'язана із заклинюванням головного валу генератору;
- шляхом модельних досліджень виявлено, що у випадку відриву лопаті та її ударі об металеву опору руйнування опори в будь-якому конструктивному варіанті неминуче через резонансні явища;
- доведено, що найбільш раціональним та надійним є конструктивне рішення опори з круглих товстостінних труб, розкісна система – хрестова;
- оптимізовано конструктивне рішення ствола опори шляхом розділення на п'ять секцій: три нижніх – розбірні – з окремих елементів, дві верхніх – суцільно зварні;
- для покращення експлуатаційного режиму та зниження ймовірності появи аварійних ситуацій рекомендовано:
 - лопаті вітрогенератору повинні бути виготовлені з легких матеріалів та обладнані антижеледними системами (електропідігрів поверхні, покриття поверхонь спеціальними сумішами, що зменшують зчеплення з кригою);
 - реалізувати механічним способом динамічну зміну кута нахилу лопатів в залежності від швидкості вітру;
 - під час ураганного вітру муфти генератору повинні від'єднати ротор від валу, лопаті повинні бути переведені у горизонтальну площину з мінімальним опором вітровому потоку;
 - при руйнуванні чи пошкодженні однієї з лопатів та розбалансуванні системи рекомендується автоматичне переведення протилежної лопаті у горизонтальне положення з подальшим відстрілом.

Використана література

1. Альохін А.М. Дійсна робота антенних опор під дією ожеледно-вітрових впливів: Автореф. дис. на здобуття наук ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 “Будівельні конструкції, будівлі та споруди” / Донбас. нац. акад. буд-ва і архіт. / А.М. Альохін – Макіївка, 2009. – 20 с.
2. Сварные строительные конструкции. В 3-х томах. Т.3. / [Лобанов Л.И., Шимановский В.Н., Шимановский А.В. и др.] – К.: ИЭС им. Е.О.Патона, 2003. – 378 с.
3. Шевченко Е.В. Оптимальное проектирование башенных радиорелейных опор / [Шевченко Е.В., Жук Н.Р., Удахин С.А.] // Вестник ДонГАСА. – Макеевка. – 2004. – №2004-2 (44). – С. 7–10.
4. Шевченко Є.В. Розрахунок баштової опори повітряної лінії електропередачі як просторової шарнірно-стрижневої системи / [Шевченко Є.В., Глухов В.О., Сапронов Ю.В., Удахін С.А.] // “Будівництво України”, 2000. – №1. – С. 41–43.
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. Сталеві конструкції. Опори повітряних ліній електропередавання, відкриті розподільні пристрої, лінії контактних мереж транспорту, антенні споруди зв'язку, річкові гідротехнічні споруди, балки з гнучкою або перфорованою стінкою. Додаткові вимоги проектування. ДСТУ Б В.2.6-194:2013. [На заміну СНиП II-23-81* у частині розділів 15*-19]. [Дата надання чинності 2014-01-01] – К.: Мінрегіонбуд України, 2013. – 23 с.
 10. 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.
 11. Общие правила проектирования стальных конструкций: СП 53-102-204 / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 2005. – 131 с.
 12. Перельмутер А.В. Башни для ветроэнергетических установок: тенденции развития / А.В. Перельмутер, М.А. Микитаренко // Вестник ДонГАСА. – Макеевка. – 2001. – №2001-5 (30). – С. 8 – 13.
 13. 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.
 14. Попов В.О. Моделювання напружено-деформованого стану опорних фланцевих вузлів баштових споруд для раціонального проектування Металеві конструкції. / В.О. Попов // Науковий журнал. Українська асоціація по металевим конструкціям. Донбаська національна академія будівництва і архітектури. Макіївка, УАМК, ДНАБіА, 2009 №4 С. 228 – 236.

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

Шишко Валерій Михайлович – головний інженер ТОВ «Енерговиріб», м. Вінниця.

Жбанкова Олександра Леонідівна – студентка Вінницького національного технічного університету.

Вальков Олег Олександрович – Вінницького національного технічного університету.

Попов Владимир Алексеевич – к.т.н., доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Винницкого национального технического университета.

Шишко Валерий Михайлович – главный инженер ООО «Энергоизделие», г. Винница.

Жбанкова Александра Леонидовна – студентка Винницкого национального технического университета.

Вальков Олег Александрович – Винницкого национального технического университета.

Vladimir Popov – Ph.D., assistant professor of industrial and civil construction Vinnytsia National Technical University.

Shishko Valery – Chief Engineer of "Energy product", Vinnytsia.

Zhbankova Alexandra – student Vinnytsia National Technical University.

Valkov Oleg – Student Vinnytsia National Technical University.