

В. Є. ВОЛКОВА, М. С. ОЛІЙНИК (ДІТ)

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД. ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ

Промислові труби є невід'ємною частиною комплексу споруд підприємств металургійної, хімічної й ряду інших галузей промисловості з моменту їх виникнення. Їх призначення полягає у викиді на значну висоту відходів виробництва із залишковим змістом шкідливих речовин. У статті представлено результати моделювання напружено-деформованого стану башти на основі методу скінченних елементів. Розглянуто та проаналізовано 6 варіантів конструктивного рішення башти, серед яких варіанти з використанням полімерів.

Ключові слова: димова башта, напружено-деформований стан, чисельне моделювання, витрати матеріалів, сталь, полімери

Промышленные трубы являются неотъемлемой частью комплекса сооружений предприятий металлургической, химической и ряда других отраслей промышленности с момента их возникновения. Их назначение состоит в выбросе на значительную высоту отходов производства с остаточным содержанием вредных веществ. В статье представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния башни на основе метода конечных элементов. Рассмотрены и проанализированы 6 вариантов конструктивного решения башни, среди которых варианты с использованием полимеров.

Ключевые слова: дымовая башня, напряжённо-деформированное состояние, численное моделирование, расход материалов, сталь, полимеры

Industrial pipes are an integral part of the complex structures of enterprises of metallurgical, chemical and other industries from the moment of their advent. Their purpose is to exhaust industrial wastes with residual content of hazardous substances on a considerable height. The paper presents the simulation results of stress-strain state of the tower based on the finite element method. Six different constructive solutions of the tower including options for using polymers are reviewed and analyzed.

Keywords: exhaust tower, stress-strain state, numerical simulation, expenditure of materials, steel, polymers

Огляд розвитку витяжних споруд

Швидкий ріст промисловості та енергетичної бази протягом останнього сторіччя, що викликав збільшення обсягів специфічних відходів виробництва, висунув у якості однієї з найважливіших світових проблем сучасності охорону чистоти атмосферного повітря.

Масштаби забруднення атмосфери і його шкідливих наслідків у народному господарстві, економіці й природі такі, що боротьба із забрудненням на сучасному етапі прийняла міжнародний характер. Одним з типів інженерних споруд, за допомогою яких відходи виробництва із залишковим змістом шкідливих речовин викидаються на значній висоті, є витяжні башти. Витяжні башти являють собою складні інженерні споруди. Витяжні башти зводяться на об'єктах таких основних галузей промисловості, як хімічна, чорна й кольорова металургія, енергетична та ін.

Промислові труби є невід'ємною частиною комплексу споруд підприємств металургійної, хімічної й ряду інших галузей промисловості з

моменту їх виникнення. Призначення й умови роботи цих споруд внаслідок безперервного росту промисловості й удосконалення технології перетерплювали істотні зміни, що накладало певні, мінливі згодом вимоги до їхньої конструкції відносно як матеріалів, так і конструктивних форм.

Перші труби зводили зі звичайної червоної цегли, вони були невеликої висоти. Тенденція до збільшення висоти труб виявила основний недолік цегли як будівельного матеріалу цих споруд – низький опір стиску. Внаслідок цього виникла потреба в значній кількості високоякісної цегли, сильно зросли обсяг і вага кладки, а звідси й необхідність у дорогому фундаменті. Неможливість механізації робіт зі зведення труб вимагала висококваліфікованих майстрів-трубоклавів. Всі ці фактори різко підвищували вартість цегляних труб.

На початку ХХ ст. з'явився новий, більш міцний матеріал – залізобетон, що і став використовуватися для зведення труб.

Перші невдачі в будівництві залізобетонних труб пояснювалися відсутністю теорії розраху-

нку залізобетонних конструкцій. Однак відповідне коло досліджень уже в першій чверті ХХ ст. дозволило зведення залізобетонних труб висотою більше 100 м. Хімічні реакції, що відбуваються в стінках труби під впливом конденсату, руйнують бетон і викликають корозію арматури, що в остаточному підсумку приводить до руйнування залізобетонної труби. Таким чином, використання залізобетонних труб, що не мають додаткових захисних покриттів, для видалення газів, що пройшли очищення й зберігають певний ступінь агресивності, виявилось неможливим. Разом з тим, для викиду неагресивних відходів виробництва залізобетонні труби досить надійні.

Більшість труб зводиться зі сталі бо цей матеріал має найбільш підходящі властивості для такого типу споруд, але вже довгий час ведеться пошук альтернативних варіантів, наприклад, у Японії на плавильному заводі гірничорудних підприємств Міцуї наприкінці 1971 р. введена в експлуатацію витяжна башта висотою 160 м з газовідвідним стовбуром діаметром 3 м з поліефірного скловолоконистого пластику. За конструктивним рішенням, залежно від ступеня суміщення технологічних і інженерних функцій у споруді, промислові труби можуть бути розділені на три основних типи: вільно оперті труби, підкріплені труби, витяжні башти.

Конструктивні рішення

Вільно оперті труби характеризуються повним сполученням технологічних і інженерних функцій, вони переважно використовуються як димові труби. Підкріплені труби (комбіновані конструктивні рішення промислових труб) характеризуються тим, що газовідвідні стовбури, виконуючи технологічні функції, одночасно беруть участь у роботі споруди, забезпечуючи разом з іншими несучими елементами споруди його міцність, жорсткість і стійкість.

Витяжні башти являють собою споруди баштового типу, що характеризуються чітким поділом інженерних і технологічних функцій і складаються із сталеві несучої конструкції й одного або декількох газовідвідних стовбурів. Несучою конструкцією, як правило, є гратчаста вежа, а газовідвідні стовбури – елемент технологічних комунікацій.

Схеми несучої башти. Відповідно до геометричних схем несучої вежі можна класифікувати за наступними характеристиками:

- за кількістю граней – трьох-, чотирьох- і багатогранні (з кількістю граней більше чотирьох);

- за конфігурацією башти – без переломів граней по висоті й з переломами граней;

- за схемою грат – із хрестовими, ромбічними й трикутними гратами, крім того, певний різновид являє вежа з розрідженими гратами.

Поперечна жорсткість чотиригранних і багатогранних веж забезпечується діафрагмами. Відстань між ними, як правило, в 1,5...2,5 рази перевищує ширину грані вежі й становить для розглянутих веж приблизно 6...15 м. Постановка діафрагм особливо необхідна в площині зламу граней вежі.

Газовідвідний стовбур витяжної вежі знаходиться під впливом горизонтальних і вертикальних сил. Горизонтальні силові впливи виникають від тиску вітрового потоку й при сейсмічних явищах; вертикальні – від ваги стовбура, теплоізоляції, антикорозійного захисту, а також ваги конденсату, пилу й інших відкладень на його стінках. Застосовувані схеми опирання газовідвідного стовбура на несучі конструкції вежі забезпечують, як правило, роздільну передачу горизонтальних і вертикальних силових впливів.

Якщо газоходи розташовані нижче нульової відмітки, то газовідвідний стовбур опирається на самостійний фундамент. Якщо газоходи підходять до газовідвідного стовбура вище основи вежі, то залежно від рівня уведення газоходів він може опиратися одним із трьох способів, а саме на самостійний фундамент або на спеціальну гратчасту опору, розташовану всередині основної несучої вежі, або на одну з нижніх діафрагм несучої вежі за умови, що витрата металу на цю діафрагму не буде перевищувати витрати металу на спеціальну опору.

Типи перерізів поясів, грат і діафрагм. Як відомо, для високих споруд баштового типу основним розрахунковим навантаженням є вплив швидкісного напору вітру на його несучі та огорожуючі конструкції. У зв'язку із цим особливого значення набуває питання вибору типу перерізів елементів споруди, оскільки від розмірів і форми прийнятих профілів багато в чому залежить сумарна величина вітрового навантаження, що діє на споруду.

У витяжних вежах, як правило, основна частка вітрового навантаження виникає від тиску вітру на газовідвідний стовбур, і все-таки тип перерізів елементів несучої вежі має також істотний вплив на загальну величину вітрового навантаження, отже, й на вагові показники споруди в цілому. На основі узагальнення досвіду проектування витяжних веж установлено, що вага вежі з елементів хрестового перерізу пере-

вершусь вагу вежі з елементів трубчастого профілю в середньому на 15...20 %. От чому вибір профілю елементів вежі повинен бути досить чітко обґрунтований з урахуванням таких показників, як витрата металу, його вартість залежно від профілю, трудомісткість виготовлення й монтажу, експлуатаційні показники.

Вихідні дані для дослідження

Об'єктом дослідження є витяжна башта газотурбінної електростанції власних потреб на Ванкорському родовищі. Башта висотою 74,5 м з одним газовідвідним стовбуром діаметром 3,6 м. Несучі функції у споруді виконує ґратчаста чотирихгранна вежа без зламу граней по висоті з постійним нахилом граней висотою 67,5 м, схема ґрат – хрестова з розпірками. Газохід вводиться вище відмітки 0,00. Стовбур виконує функції елемента технологічних комунікацій та несучі функції для навісної площадки, він опирається на поперечні діафрагми розташовані через 12 м, що забезпечують поперечну жорсткість споруди. Ґрати виконані зі спарених кутників таврового профілю, стійки з труб, для площадок використані двотаври, кутники, швелери.

Несучі елементи споруди виконані із сталі класів С345-3 та С345-4, другорядні елементи із сталі С245, стовбур із сталі класу С345-4.

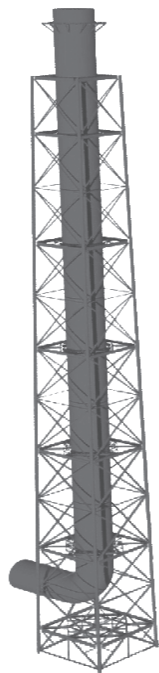


Рис. 1. Візуалізація вихідної башти в пакеті 3ds Max Design 2011

Ця робота має наступні цілі:

- підбір полімерного матеріалу за відповідними вимогами до властивостей;
 - оцінка можливості використання обраного полімеру в якості конструкційного матеріалу для несучої вежі витяжної башти або окремих її частин;
 - порівняння обрахованих варіантів за характером роботи під навантаженнями, за витратами матеріалів для їх виготовлення та за масою конструкцій;
- В ході дослідження визначені наступні варіанти для порівняння:
- металева башта з кутниковою решіткою та металевим стовбуром;
 - металева башта з трубною решіткою та металевим стовбуром;
 - металева башта з полімерним стовбуром;
 - полімерна башта з металевим стовбуром та діафрагмами;
 - башта з металевими стійками, діафрагмами та полімерними елементами ґрат;
 - металева башта з полімерною насадкою.

Характеристики матеріалів

Для основних несучих металевих елементів діафрагм та стовбура використовується сталь класу С345-4 та С345-3 для несучої башти. В ході дослідження було обрано полімер для дослідження та розрахунків, це – поліамід ПА-6 «Арамід» вуглеценаповнений – Арамід ПА УВ 30, введені добавки у базовий поліамід дозволяють істотно змінити його якості та надати композиціям на його основі:

- більш високу теплостійкість;
- підвищити його жорсткість та міцність;
- підвищити стійкість матеріалу до атмосферних факторів впливу;
- надати матеріалу властивості негорючості і т.д.

Цей матеріал має, порівняно, досить високі показники жорсткості та міцності, нормально поводить себе в не обхідних температурних умовах та сприймає атмосферні впливи. Важливим фактором, що вплинув на вибір матеріалу це його довговічність, яка гарантується в залежності від виробника до 25...30 років і в цей же час відповідно до додатку В ДБН В.1.2-2-2006 «Навантаження та впливи» строк експлуатації даного виду споруд складає 30 років. Так як дана споруда обслуговує нафтове родовище то для таких споруд немає потреби у продовженні строку експлуатації.

Основні положення до моделювання та розрахунку

Для розрахунків даної споруди була створена тривимірною моделлю споруди у програмному комплексі Autodesk Revit Structure 2011. Ця програма обрана для роботи бо має зручний та динамічний інтерфейс та необхідні можливості для подібного моделювання. Дана програма включає спеціалізовані функції для проектування та розрахунку будівельних конструкцій. В основі ПК лежить технологія інформаційного моделювання будівель (BIM).

Середою концептуального проектування являє собою різновид редактора сімейств; в ній передбачені складні засоби і методики розробки нових сімейств формують елементів, призначені для проектувальників. Принципові конструкції містять інтелектуальні дані моделі, що дозволяє вносити необхідні зміни без повторного створення конструкції.

Після цього за допомогою спеціальних програмних надбудов модель створена в Revit Structure імпортується у Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011. Ця програма для скінченно-елементного розрахунку і аналізу будівельних конструкцій. Імпортована модель приводиться до розрахункової у напівручному режимі, тобто визначаються типи скінченних елементів, їх властивості, зв'язки між елементами, переробляються ті частини споруди які були не вірно імпортовані або ж ті які мають відмінності у конструктивній та розрахунковій схемах.

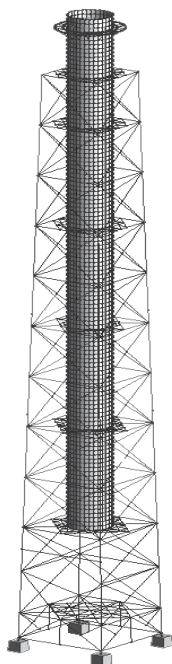


Рис. 2. Скінченно-елементна модель башти, створена в ПК Robot Structural Analysis 2011

Модель побудована на поверховому принципі, тобто створюється сітка вертикальних та горизонтальних рівнів, які співпадають з основними змінами в конструкціях – рівні площадок, перепади перерізів стійок та ін. Основних рівнів 15 та 4 додаткових.

Опис моделі:

Кількість вузлів: 4500

Стрижньові скінченні елементи: 1138

Площинні скінченні елементи: 3904

Об'ємні скінченні елементи: 0

При моделюванні стрижньові скінченні елементи використовуються для елементів несучої башти та діафрагм, а площинні скінченні елементи використовуються для моделювання стовбура.

Дослідження напружено-деформованого стану виконувалось для наступних навантажень:

- власна вага конструкцій;
- снігове навантаження;
- корисне навантаження на площадки;
- вітрове навантаження;

Власна вага прикладається автоматично до кожного елемента з відповідним коефіцієнтом у розрахунковій програмі.

Корисне та снігове навантаження збираються з площі усіх площадок та прикладаються рівномірно розподіленим завантаженням до несучих балок площадок.

Основним для цього виду конструкцій є вітрове навантаження, на відміну від башт та щогл основним є навантаження не на елементи башти, а на стовбур.

Вітрове навантаження прикладається у вигляді двох осьових складових із трапецієвидних розподілених навантажень до кожного елемента башти.

Вітрове навантаження на стовбур прикладається у вигляді трапецієвидного розподіленого по поверхні стовбура завантаження.

Аналіз результатів

Варіанти при яких загальна вага конструкцій зростає не має сенсу, бо однією з цілей використання полімерних матеріалів є зменшення ваги, це варіанти з повністю полімерною баштою та полімерною насадкою.

Варіант з решіткою із труб економніший за витратами сталі на 9 %, але треба враховувати місце будівництва і доступний для транспортування прокат.

Полімерний стовбур дозволяє значно полегшити конструкції, бо важить на 85 % менше.

При використанні полімерних пов'язів загальна вага конструкцій знижується на 12 %.

Таблиця 1

Зведена таблиця витрат матеріалів, кг

№ варіанту	Арамід ПА УВ 30		Сталь С345	
	Стовбур	Башта	Стовбур	Башта
1			32478	61321
2			32478	53199
3	4913			61321
4		68273	32478	17630
5		11141	32478	38775
6		22094	32478	47241

Висновки

За результатами досліджень можна визначити наступне. Цілком полімерна башта не є доцільним рішенням, принаймні для споруд такої висоти, оскільки для виконання умов граничних переміщень потрібно через мірно збільшувати перерізи. Комбіновані варіанти – металеві стійки і полімерні пов'язи; металева башта з полімерною насадкою; – досить добре працюють під навантаження, мають меншу загальну вагу конструкцій, але вимагають розрахунку у кожному окремому випадку у відношенні до того яку частину конструкцій можна виконувати із полімерів аби споруда виконувала свої функції у межах норм. Металева башта із полімерним стовбуром – досить ефективне рішення, окрім того що полімерний стовбур має приблизно в 6 разів меншу вагу він ще вимагає меншого захисту від агресивного середовища, тому що його стійкість більша за стійкість сталі.

Загалом рішення з використанням полімерів можуть бути досить ефективні але мають буду прораховані для конкретного проекту і розроблені більш детально ніж в межах учбового проекту. До основних питань які належить вирішити відносяться наступні вдосконалення методик розрахунків конструкцій з полімерів, розробка конкретних конструктивних рішень полімерних конструкцій, вирішення вузлів металевих та полімерних елементів, вдосконалення технологій виготовлення полімерів.

Але всі ці проблеми з часом вирішуються, тому що розвивається наука, полімерні матеріали дешевшають з часом, на відміну від сталі, яка буде тільки дорожчати, бо її поклади не безмежні та виробництво прив'язане до них територіально, тому завжди буде стояти питання транспортування.

Полімерні споруди – це майбутнє будівництва, тому щоб наша країна не відставала від світу потрібно вже сьогодні починати активні дослідження з приводу можливості використання полімерів в будівництві.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Коренев, Б. Г. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия [Текст] / Б. Г. Коренев, И. М. Рабинович. – М.: Стройиздат, 1981. – 215 с.
2. Солодарь, М. Б. Металлические конструкции вытяжных башен воздействия [Текст] / М. Б. Солодарь, М. В. Кузнецов. – Л.: Стройиздат, 1975. – 186 с.
3. Беленя, Е. И. Металлические конструкции [Текст] / Е. И. Беленя, А. А. Васильев, Д. И. Стрелецкий. – М.: Стройиздат, 1976. – 588 с.
4. СНиП II-23-81* Нормы проектирования. Стальные конструкции [Текст]. – М.: Стройиздат, 1980. – 70 с.
5. СНиП 2.09.03-85 Сооружения промышленных предприятий [Текст]. – М.: Стройиздат, 1987. – 91 с.
6. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження та впливи. Норми проектування [Текст]. – К.: Мінбуд України, 2006. – 60 с.
7. Суханов, В. В. Проектно-вычислительный комплекс Autodesk Robot Structural Analysis 2011 [Текст] / В. В. Суханов.
8. Металлические конструкции (справочник проектировщика) [Текст] : в 3 т. / под ред. В. В. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1998. – 102 с.
9. Металлические конструкции. Элементы конструкций. – Т. 1 [Текст] / под ред. проф. В. В. Горева. – М.: Высш. шк., 2004. – 552 с.
10. Металлические конструкции. Элементы конструкций. – Т. 3 [Текст] / под ред. проф. В. В. Горева. – М.: Высш. шк., 2004. – 275 с.

Надійшла до редколегії 02.12.2010.

Прийнята до друку 21.12.2010.