

РОЗВИТОК МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ І КОНСТРУЮВАННЯ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД: ВІД ЕЙФЕЛЕВОЇ ВЕЖІ ДО НАЦІОНАЛЬНОГО СТАДІОНУ СІНГАПУРСЬКОГО СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСУ

Вячеслав АДАМЕНКО

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037
vchsvet@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-7469-9585>

Анотація. Із аналізу принципів і методів проектування всесвітньо відомих Ейфелевої вежі, яка на момент зведення була найвищою у світі ве-жею (312.12 м), та Національного стадіону сінгапурського спортивного комплексу, який є найбільшим у світі сталевим куполом (діа-метр 310 м), прослідковано трансформацію підходів до розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд.

На основі архітектурної, конструктивної, організаційної, технологічної і економічної частин оригінального проекту Ейфелевої вежі, детально розглянуто процес її проектування та зведення. Показано, що проектування і зведення вежі виконано при ґрунтовній теоретичній підготовці, широкому застосуванні математичного апарату, ручних розрахунків усіх частин проекту, використанні залізниць, парових кранів та індустріальному виготовленні елементів сталевих конструкцій.

Проаналізовано послідовність розробки проекту і зведення куполу Національного стадіону сінгапурського спортивного комплексу, із створенням 3D параметричної моделі, розрахунками за допомогою методу скінченних елементів, комп'ютерною оптимізацією форми і розмірів конструктивних елементів, програмуванням спеціальних модулів і розробкою алгоритмів для забезпечення сумісної роботи різних програмних комплексів, та конструюванням, деталюванням, розробкою креслень, а також, передачею всієї необхідної інформації на завод металоконструкцій, для їх виготовлення на станках з ЧПУ, за допомогою 3D BIM-інформаційних систем.



Вячеслав АДАМЕНКО
доцент кафедри металевих та
дерев'яних конструкцій
к.т.н., доцент.

Зроблено висновок, що завдяки розвитку інформаційних технологій, відбувся перехід від ручного виконання до переважного застосування комп'ютерних методів розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд.

Запропоновано шляхи удосконалення подальшого розвитку методів та підходів до розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд.

Ключові слова. BIM; BIM-технології; інформаційне моделювання; 3D моделювання; металеві конструкції; комп'ютерні методи розрахунку; комп'ютерні методи конструювання сталевих конструкцій.

ВСТУП

Прагнення людства до упорядкування життєвого простору, забезпечення практичних потреб існування суспільства та необхідності до самовираження в об'єктах архітектури, сприяли неспинному розвитку будівельної галузі на протязі багатьох століть, напрацюванню методів і способів проектування та зведення будівель і споруд, появи

оригінальних конструктивних рішень із різного роду матеріалів, що дуже часто досягалося за рахунок практичного досвіду, шляхом аналізу та виправлення невдалих спроб і помилок.

Усвідомлення необхідності наукового підходу до будівництва, сприяло появі досвідчених інженерів - дослідників, формуванню інженерних напрямків, створенню інженерних шкіл та потужних навчальних закладів вищої освіти з підготовки інженерів різних інженерних напрямків, що в цілому забезпечило невідомий розвиток будівництва та архітектури.

Сучасний розвиток науки і техніки в цілому, інформаційних технологій, зокрема числових методів розрахунку і проектування, з одного боку, та технології зведення будівель і споруд з іншого, дає можливість проектувати та зводити будівлі і споруди абсолютно різних архітектурних стилів та форм, поверховості та площі, конструктивних рішень несучих елементів та видів використовуваних матеріалів і їх комбінацій.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Розвиток методів розрахунку в історичному контексті приведений в ґрунтовній праці С.П.Тимошенка (Stephen P. Timoshenko) [15]. Хоча безпосередньо його праця присвячена історії опору матеріалів, автор детально зупиняється на історії розвитку інженерної справи в цілому, починаючи із аналізу досягнень стародавніх єгиптян, греків і римлян, розглядає класичні праці Галілея, Гука, Ейлера та інш., акцентує увагу на розвитку інженерних шкіл і провідних вчених кожної із епох, наводить детальні відомості щодо розвитку методів розрахунку на кожному із етапів становлення інженерної справи.

Колектив авторів під керівництвом В.А. Баженова в праці [16], на основі фактів з життя і діяльності відомих дослідників, розглядає історію виникнення і розвитку варіаційних принципів будівельної механіки, а також механіки в цілому, і за задумом пред-

ставлена у вигляді нарисів розвитку окремих напрямів, кожному з яких притаманна певна історія виникнення і становлення відповідних понять, ідей, принципів, проблем та методів їх реалізації.

Приклад реалізації сучасних підходів до розрахунку за допомогою спеціалізованих програмних комплексів, що реалізують метод скінченних елементів у переміщеннях, приведений в роботах [11, 12] при дослідженні напружено-деформованого стану монолітного ребристого перекриття силосу за допомогою ПК Ліра-САПР, в роботі [13] при дослідженні напружено-деформованого стану сталевих каркасів аеропорту за допомогою ПК Dlubal RSTAB і ПК Dlubal RFEM.

Суттєвим поштовхом у розвитку методів конструювання сталевих будівель і споруд стала поява ВІМ-технологій, які за рахунок створення єдиної інформаційної моделі, дозволяють виконувати конструювання та деталювання вузлів в 3D просторі, автоматично формувати специфікації і необхідні вигляди та проєкції при компонуванні креслень.

Переваги використання ВІМ-технологій, проблеми і виклики при їх застосуванні, а також, сучасний стан розвитку висвітлені в роботах [17, 18]. Досвід впровадження ВІМ-технологій в навчальний процес на кафедрі металевих і дерев'яних конструкцій КНУБА представлено в роботі [14]. При конструюванні і деталюванні елементів сталевих конструкцій в роботах [13, 19], елементів дерев'яних конструкцій купольного покриття в роботі [20].

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета та завдання дослідження полягає в аналізі та узагальненні, на прикладі всесвітньо відомих сталевих будівель і споруд, результатів розвитку методів розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд, рівня інтеграції спеціалізованих програмних комплексів в проектну практику, трансформації підходів і принципів їх проектування за останні півтора століття.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Матеріали та методи дослідження включають аналіз та узагальнення методів розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд на прикладі найбільш високої в світі вежі на момент зведення, Ейфелевої вежі, з ручними розрахунками і конструюванням, та найбільшого в світі сталевого куполу Національного стадіону сінгапурського спортивного комплексу, запроєктованого за допомогою сучасних інформаційних систем.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

За останній час, побудована велика кількість будівель і споруд, які є прикладами узагальнення і комбінації досвіду напрацьованого попередніми поколіннями та сучасних знань і можливостей технічних засобів. До таких об'єктів відносяться в першу чергу всесвітньо відомі будівлі та споруди, які є лідерами в певних напрямках: архітектурної виразності, незвичності форми або розмірів, оригінальності конструктивних рішень, застосування сучасних матеріалів та їх комбінацій, сучасних технологій зведення.

Розглядаючи сталеві будівлі і споруди, важко залишити поза увагою Ейфелеву вежу (Eiffel Tower), яка спочатку досить критично була сприйнята частиною суспільства, проте, згодом стала символом не тільки м. Парижу, але і взагалі Франції у світі. Незважаючи на значний проміжок часу, який пройшов із моменту її відкриття, зберігся детальний опис її конструктивної частини, технології зведення, ліфтового обладнання, а також економічних розрахунків, які Г. Ейфель (G. Eiffel) та фахівці його компанії виклали в роботах [1, 2], додатково, опис ліфтової частини вежі разом із поясненнями Г. Ейфеля щодо принципів її роботи були опубліковані також А. Ансалоні (A. Ansaloni) у роботі [3]. Звичайно, зважаємо на те, що під час планових ремонтів і відновлень, а також часткової модернізації обладнання, значна кількість сталевих конструктивних елементів та частина ліфтового обладнання були

замінені, однак, оригінальність конструктивних рішень сталеві вежі, підходи до її розрахунку і зведення не втратили своєї актуальності.

Висота конструктивної частини Ейфелевої вежі становить 300 м, що відповідає символічному числу у 1000 футів (фактично 984 фути), висота вежі разом зі флагштоком відразу після побудови у 1889 році становила 312.12 м, сучасна версія разом із антеною має висоту 324 м. По висоті вежі передбачено три основні платформи на відмітках відповідно 57.61 м (189 футів), 115.82 м (380 футів), 276.15 м (906 футів), і одна проміжна платформа на відмітці 195.99 м (643 фути) [1, 2, 3]. Після зведення вежі, Г. Ейфеля часто критикували, що він навмисно вибрав архітектурно виразну форму, ігноруючи при цьому інженерні закони щодо несучої здатності вежі, однак Г. Ейфель надав пояснення, що дана форма вежі отримана математичним шляхом і на його думку дозволяє їй якнайкраще сприймати вітрові навантаження [4].

Сучасний та запроєктований в роботі [2] вигляди Ейфелевої вежі приведені на рис. 1. Власна вага сталевих несучих конструкцій надземної частини вежі становить 7 341 214 кг, тобто 7 341 т [1, стор. 17], загальна вага надземної частини вежі включно із обладнанням і оздобленням складає 9 699 490 кг, тобто 9 700 т [1, стор. 21], за даними офіційного вебсайту [4], сучасна загальна вага надземної частини вежі складає 10 100 т. Загалом, сталева конструкція вежі була розділена на 28 основних і верхню 29-у секцію, збір вертикальних навантажень виконаний переважно у табличній формі із детальними поясненнями, приведена діаграма розподілу ваги конструкції по висоті, та детальні дані по кожній із секцій. Окрім збору вертикальних навантажень, в роботі [1] приведено визначення навантажень на фундаменти та виникаючих в них внутрішніх зусиль від кожної із секцій вежі, збір навантажень і визначення внутрішніх зусиль від дії різних напрямків вітрових навантажень для

кожної із секцій окремо, приведена діаграма зусиль від різних видів навантажень по висоті і визначена огинаюча, а також підбір перерізів елементів.

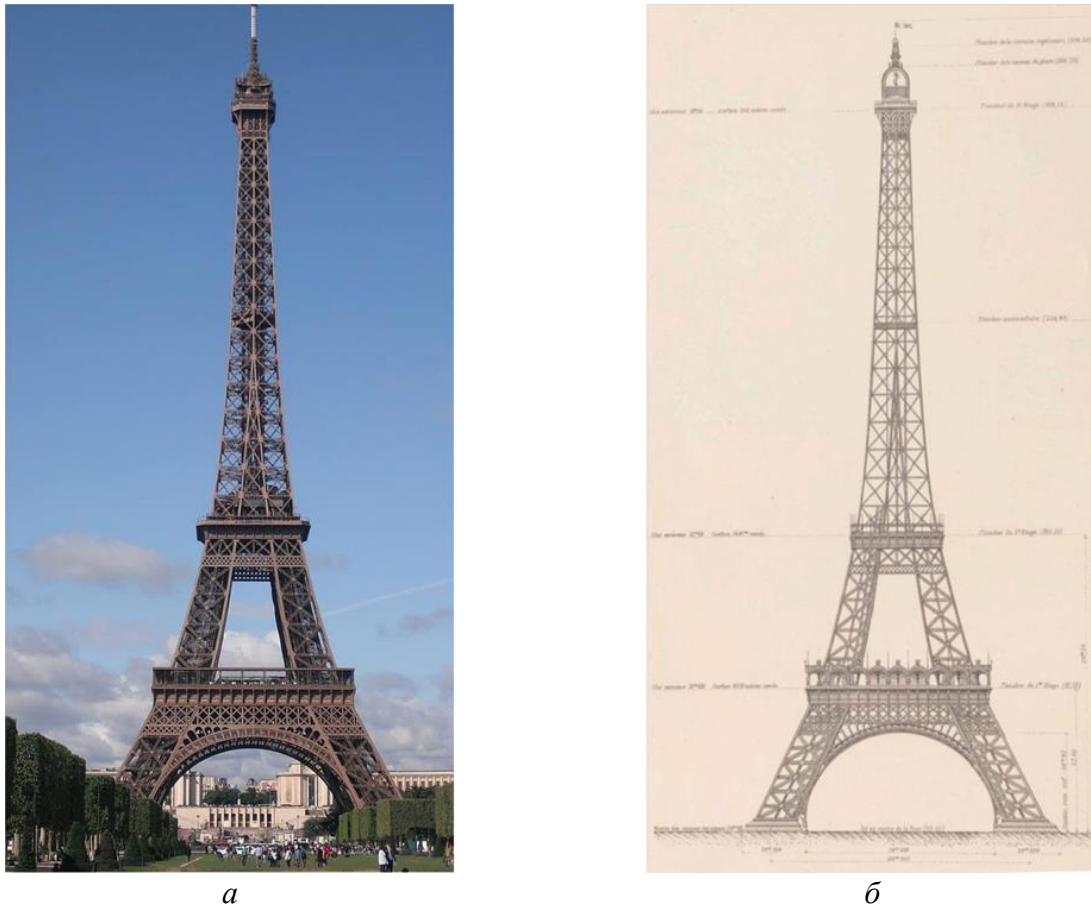


Рис.1. Сучасний (а) та запроєктований (б) [2] вигляди Ейфелевої вежі
Fig.1. Modern (a) and projected (b) [2] views of the Eiffel Tower

Зведення Ейфелевої вежі було розпочато 26 січня 1887 року з улаштування фундаментів, і вже 1 липня 1887 року розпочали монтаж сталевих опор [4]. Фото опори №4, а також вигляд вежі після зведення 1-го та 2-го рівнів приведено на рис. 2, 3 [2]. Роботи з улаштування фундаментів виконувалися вручну, сталеві елементи конструкцій виготовлялися і збиралися довжиною близько 5 м на заводі Г. Ейфеля (Levallois-Perret), який був розміщений на околиці м. Парижу. Спочатку сталеві елементи збиралися за допомогою болтів, після чого один за одним були замінені на заклепки, які перед встановленням термічно розігрівалися. Надалі зібрані сталеві елементи доставлялися на будівельний майданчик для монтажу. Близько однієї

третини із 2.5 мільйонів заклепок було встановлено безпосередньо на будівельному майданчику.

Монтаж елементів першого рівня виконували за допомогою 12-ти дерев'яних риштувань висотою 30 м, і чотирьох висотою 40 м, для вищих відміток використовували невеликі парові крани, які встановлювалися на верхніх точках елементів вежі.

Будівництво було завершено 31 березня 1889 року, через 2 роки 2 місяці і 5 днів після початку робіт, над проєктом працювало 50 інженерів, 150 робітників заводу Г. Ейфеля, від 150 до 300 робітників на будівельному майданчику.

Загалом, із аналізу проєкту [1, 2] та пояснень наданих Г. Ейфелем на задані питання, зокрема опублікованих А. Ансалоні в роботі

[3], впливає, що зведення вежі було добре теоретично підготовлено та практично реалізовано на досить високому рівні, із ручними розрахунками усіх частин проекту, архітектурної, конструктивної, організації і те-

хнології будівництва, технологічної (ліфтове обладнання, освітлення та інш.), економічної, включно із розрахунками інвестиційної складової, використанням залізниці, парових кранів та індустріальним виготовленням елементів сталевих конструкцій.



Рис.2. Опора №4 Ейфелевої вежі 18 липня 1887 року [2]

Fig.2. Support No. 4 of the Eiffel Tower on July 18, 1887 [2]



a



б

Рис.3. Ейфелева вежа 20 березня 1888 року після зведення першого рівня (а) [2] та 21 серпня 1888 року після зведення другого рівня (б) [2]

Fig.3. The Eiffel Tower on March 20, 1888 after the building of the first level (a) [2] and on August 21, 1888 after the building of the second level (b) [2].

Прикладом сучасного підходу до проектування і будівництва сталевих будівель і споруд слугує Сінгапурський спортивний комплекс (Singapore Sports Hub), який відкрився для відвідувачів у червні 2014 року, та складається із новозбудованого Національного стадіону (National Stadium) на 55 тисяч глядачів, існуючого Сінгапурського критого

стадіону (Singapore Indoor Stadium) на 12 тисяч глядачів, новозбудованих ОСВС Аквacentру (OCBC Aquatic Centre) на 6 тисяч глядачів, ОСВС Арени (OCBC Arena) на 3 тисячі глядачів, Центру водних видів спорту (Water Sports Centre), Аквапарку для дітей (Splash-N-Surf facility), дворівневого торговельного центру, музею, бібліотеки, а також

відкритих спортивних площадок для волейболу, боулінгу, баскетболу, скейт-парк, бігові і велосипедні доріжки. Детальний опис спортивного комплексу приведений в роботах [5, 6].

Національний стадіон (National Stadium) запроєктований і побудований міжнародною компанією Agur у співпраці із генпідрядною компанією Dragages Singapore Pte Ltd, яка є частиною французької компанії Bouygues Construction, та Сінгапурським архітектурним бюро DP Architects Pte Ltd, у вигляді сталевого куполу діаметром 310 м, який із моменту зведення у 2013 році є найбільшим у світі куполом. При розробці проєкту, фахівці компанії Agur, під керівництвом проєкт-менеджера А. Генрі (Andrew

Henry), головного конструктора М. Кінга (Mike King), головного архітектора К. Люїса (Clive Lewis), реалізували можливість для 55 тисяч глядачів зручного перегляду спортивних змагань із футболу, регбі, крикету і легкої атлетики, шляхом улаштування механізмів автоматизованої перестановки глядацьких місць для різних видів змагань, а також захист глядачів від сонця і дощу в умовах тропічного клімату, за рахунок улаштування розсувних частин покриття куполу. З іншого боку, унікальне місцерозташування Сінгапуру, відсутність снігу та значної сейсмічної активності, невеликі вітрові навантаження, надали проєктувальникам унікальні архітектурні і конструктивні переваги [5].



a



б

Рис.4. Національний стадіон Сінгапуру з відкритими (а) [10] та закритими (б) [5] розсувними частинами покриття куполу

Fig.4. Singapore National Stadium with open (a) [10] and closed (b) [5] moving roof parts of the dome

Фото Національного стадіону з відкри-

тими і закритими розсувними частинами покриття куполу, приведено на рис. 4.

Каркас куполу утворений системою сталевих основних, поперечних, перехоплюючих, діагональних, другорядних і жалюзійних просторових аркових ферм трикутного перерізу, які перетинаються між собою, забезпечують його необхідну несучу здатність та просторову жорсткість. Опис конструктивної частини куполу детально приведений в публікаціях [7, 8, 9].

Шість основних просторових ферм мають змінні ширину і висоту, із мінімальним значенням висоти близько 2.5 м (в точках опирання) і максимальним близько 5 м (по центру). Дві поперечні аркові ферми формують довгу сторону відкритої частини куполу. Діагональні ферми зв'язують між собою сусідні ферми, утворюючи жорсткі трикутні просторові сегменти куполу. Другорядні ферми розміщені між основними і діагональними фермами із кроком 6 м, безпосередньо сприймаючи навантаження від панелей покриття. Усі ферми виготовлені із холодно та гарячекатаних профілів CHS, сталі класу S355, діаметр поясів основних ферм від 457 мм до 508 мм, другорядних максимально 356 мм [5, 9].

Купол в своїй опорній частині має діаметр 310 м, висоту 76 м від рівня опирання та загальну висоту над поверхнею ґрунту 85 м. В верхній частині куполу передбачено відкриту ділянку довжиною 220 м і шириною 82 м, яка при необхідності закривається розсувними частинами даху куполу [5].

Опирання елементів каркасу куполу реалізовано через опорні блоки на залізобетонну кільцеву балку, верхня точка якої розміщена на рівні 9 м від поверхні землі і має переріз 6 м (b.) на 1.5 м (h) із потовщенням до 2.0 м (h) у місцях розміщення опорних блоків. Кільцева балка армована попередньо напруженими стержнями, 7 у верхній зоні і 7 у нижній, кожен стержень складається із 17 жил діаметром 15.7 мм, попереднє напруження виконували покровоко, для стержнів довжиною близько 100 м. Кільцева балка опирається на пари колон, у місцях розташування опорних блоків, діаметром 1400 мм, та проміжні, діаметром 1100 мм, що розміщені із кроком 12...18 м [8]. Фото внутрішньої конструктивної частини куполу приведено на рис. 5.

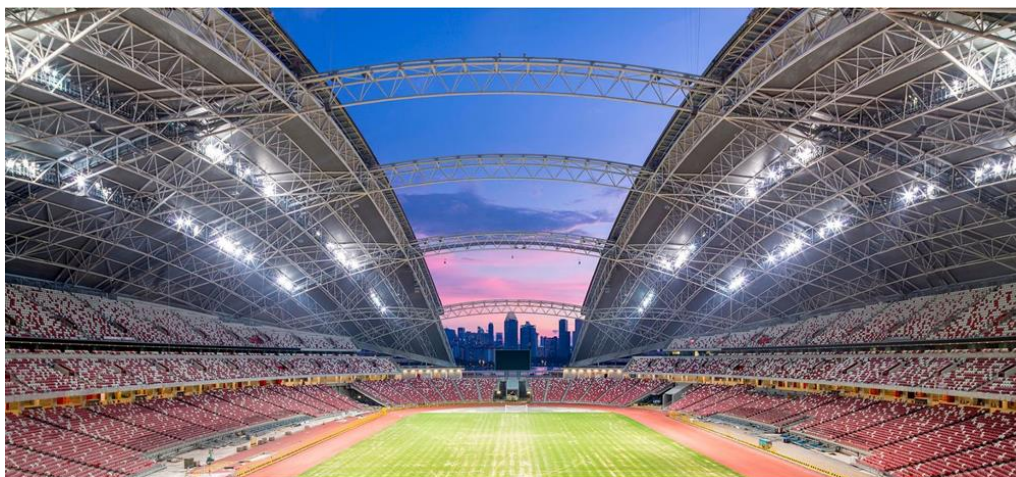


Рис. 5. Вид на куполу Національного стадіону Сінгапуру із середини [10]

Fig. 5. View of the dome of the National Stadium of Singapore from the center [10]

Проектування сталевих куполу виконувалося за допомогою декількох спеціалізованих комп'ютерних програм. На час роботи над проектом, до команди із 40-ка архітекторів та інженерів, компанія Агір залучила також і програмістів, які розробили додаткові спеціалізовані програми та модулі, і таким

чином, забезпечили взаємозв'язок між програмним забезпеченням різних розробників [6].

Пошук найкращої геометричної форми ярусів, яка стала основою для форми куполу, був виконаний за допомогою спеціально розробленої програмістами компанії Агір програми, базою для якої став 3D CAD

програмний комплекс Microstation. Остаточне рішення щодо форми куполу, було прийняте фахівцями компанії Agur базуючись на візуальному сприйнятті та із залученням емпіричних методів, таким чином, методи чисельної оптимізації на цьому етапі не використовувалися [7].

На наступному етапі, у програмному комплексі Digital Project (DP), була створена 3D параметрична модель куполу, тобто модель, у якій конструктивні елементи зв'язані між собою параметрично, при зміні одного параметру, інші змінюються автоматично. Параметрична модель у ПК Digital Project була зв'язана із ПК General Structural Analysis (Oasys GSA), який є програмним комплексом для розрахунків на основі методу скін-

ченних елементів, за допомогою спеціального плагіну. Додатково, програмістами компанії Agur був розроблений програмний модуль до ПК Oasys GSA, враховуючи, що ПК Oasys GSA являється власним комерційним продуктом компанії, який дозволив оперативно виконувати оптимізацію форми і розмірів конструктивних елементів куполу [7, 8]. Командою проектувальників було виконано безліч ітерацій, як вказано в роботі [7], параметрична модель у ПК Digital Project оновлювалася кожні 2 дні на протязі 2-ох місяців, таким чином, дане рішення дозволило значно пришвидшити і забезпечити якість у процесі пошуку конструктивних параметрів сталевого куполу.

Параметрична модель куполу у ПК Digital Project приведена на рис. 6.

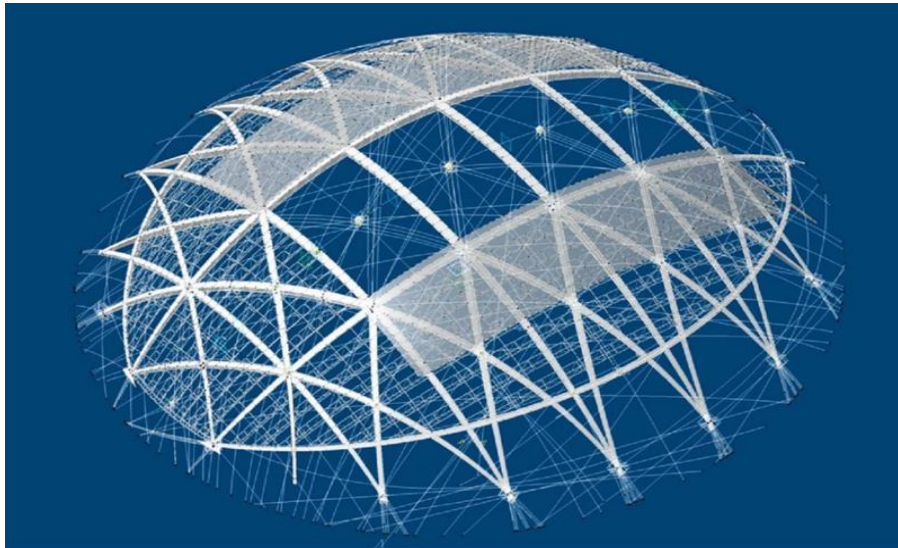


Рис. 6. Параметрична модель куполу у ПК Digital Project [7]

Fig. 6. Parametric model of the stadium roof in PC Digital Project [7]

Програмістами компанії Agur був розроблений програмний модуль, який дозволив після завершення ітераційного процесу та остаточної оптимізації сталевих конструктивних елементів куполу, передати всю наявну інформацію із скінченно-елементної моделі ПК Oasys GSA, без втрат, включно з інформацією щодо розрахункових зусиль у з'єднаннях, зон концентрації напружень та інше, в 3D BIM програмний комплекс будівельного інформаційного моделювання Tekla Structures, в якому не тільки були розроблені усі необхідні креслення, але також BIM інформаційна модель, яка включала

всю необхідну інформацію для виготовлення сталевих конструкцій, була передана напряму виробнику на завод металоконструкцій [8].

Проектування конструкцій покриття куполу, стаціонарно закріпленого, а також на розсувних частинах покриття, які безпосередньо опираються на другорядні аркові ферми, виконувалося за допомогою архітектурного 3D графічного програмного комплексу Rhinoceros та програмного комплексу архітектурної параметризації Generative Components [7].

Для можливості прийняття обґрунтованого рішення щодо забезпечення вентиляції простору під куполом, що особливо актуально в умовах тропічного клімату Сінгапуру, в програмному комплексі Generative Components була створена окрема параметрична модель, яка у взаємодії із програмним комплексом для моделювання освітлення Radiance, що стало можливим завдяки спеціально створеному для цього скрипту, дозволила провести оптимізацію форми і положення жалюзійної частини куполу на основі генетичного алгоритму [7].

Загалом, за словами авторів [7, 8], реалізація доволі складного проєкту сталевих куполу Національного стадіону, стала можливою тільки завдяки застосуванню сучасної комп'ютерної техніки і програмного забезпечення, усього при реалізації проєкту було використано сім спеціалізованих програмних комплексів та безліч плагінів і скриптів, які забезпечили їх сумісну роботу та коректну передачу інформації між ними.

Таким чином, із аналізу принципів і методів проєктування всесвітньо відомих Ейфелевої вежі, яка на момент зведення була найвищою у світі вежею (312.12 м), та Національного стадіону сінгапурського спортивного комплексу, який є найбільшим у світі сталевим куполом (діаметр 310 м), прослідковано трансформацію підходів до розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд. Від Ейфелевої вежі, із ґрунтовною теоретичною підготовкою, широким застосуванням математичного апарату, ручними розрахунками усіх частин проєкту, використанням залізничі, парових кранів та індустріальним виготовленням елементів сталевих конструкцій, до Національного стадіону сінгапурського спортивного комплексу, із створенням 3D параметричної моделі, розрахунками за допомогою методу скінчених елементів, комп'ютерною оптимізацією форми і розмірів конструктивних елементів, програмуванням спеціальних модулів і розробкою алгоритмів для забезпечення сумісної роботи різних програмних комплексів, та конструюванням, деталюванням, розробкою креслень, а також, передачею всієї не-

обхідної інформації на завод металоконструкцій, для їх виготовлення на станках з ЧПУ, за допомогою 3D ВІМ-інформаційних систем.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Із аналізу принципів і методів проєктування всесвітньо відомих Ейфелевої вежі, яка на момент зведення була найвищою у світі вежею (312.12 м), та Національного стадіону сінгапурського спортивного комплексу, який є найбільшим у світі сталевим куполом (діаметр 310 м), прослідковано трансформацію підходів до розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд.

2. Встановлено, що при проєктуванні складних з конструктивної точки зору сталевих будівель і споруд, завдяки розвитку інформаційних технологій, відбувся перехід від ручного виконання до переважного застосування комп'ютерних методів розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд.

3. Подальший розвиток методів та підходів до розрахунку і конструювання сталевих будівель та споруд, повинен ґрунтуватися на інтеграції різних програмних комплексів і систем між собою, створенні єдиної системи специфікацій і форматів обміну даними, розробці універсальних інформаційних систем, які об'єднують створення 3D ВІМ-інформаційної моделі, розрахунок, конструювання і деталювання, підготовку і передачу інформації на завод металоконструкцій, для їх виготовлення на станках з ЧПУ.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Eiffel G.** La Tour De Trois Cents Mètres. Texte / Gustave Eiffel // *Société Des Imprimeries Lemerrier, Paris, 1900, Exempleire № 96, 400 p.*
2. **Eiffel G.** La Tour De Trois Cents Mètres. Planches / Gustave Eiffel // *Société Des Imprimeries Lemerrier, Paris, 1900, Exempleire № 57, 288 p.*
3. **Ansaloni A.** Description of the Lifts in the Eiffel Tower / Mr. A. Ansaloni // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1889, Vol. 40, Issue 1, P. 350-378. - Access Mode:*

- https://doi.org/10.1243/pime_proc_1889_040_020_02.
4. **Origins and Construction** of the Eiffel Tower [Virtual Resource] / *Société d'Exploitation de la Tour Eiffel (SETE), Eiffel Tower's official website*. - Access Mode: <https://www.toureiffel.paris/en/the-monument/history>. - Date of Access: 26 July 2021.
 5. **Henry A.** Singapore Sports Hub / A. Henry, C. W. Kam, C. Lewis, M. Smith, M. King, N. Boulter, P. Hoad, R. Wong, S. Munro, S. L. Ming // *The Arup Journal*, 2015, Issue 1, P. 24-51.
 6. **Henry A.** Feature story: The Singapore Sports Hub / A. Henry, C. Lewis, M. King, M. Finlay, M. S. Chiang // *The Singapore Profile, Arup Singapore Pte Ltd*, 2014, Issue 2, P. 2-21.
 7. **Hladik P.** Singapore National Stadium Roof / P. Hladik, C. J. Lewis // *International Journal of Architectural Computing*, 2010, Volume 8, Issue 3, P. 257-277. - Access Mode: <https://doi.org/10.1260/1478-0771.8.3.257>.
 8. **Lewis C.** Designing the world's largest dome: the National Stadium roof of Singapore Sports Hub / Clive Lewis and Mike King // *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 2014, Volume 7, Issue 3, P. 127-150. - Access Mode: <http://dx.doi.org/10.1080/19373260.2014.911485>.
 9. **King M.** Application Of High Strength Niobium Grain-Refined Steels To A Re-Design Of The Singapore National Stadium Roof / M. King, W. Whitby, G. Hanshaw // *Proceedings of the Value-Added Niobium Microalloyed Construction Steels Symposium, CBMM (Brazilian Metallurgy and Mining Company) and TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), Singapore*, 2015, P. 213-252.
 10. **Singapore SportsHub** [Virtual Resource] / *DP Architects*, 2014, *ArchDaily website*. - Access Mode: <https://www.archdaily.com/523365/singapore-sportshub-dparchitects>. - Date of Access: 31 July 2021.
 11. **Адаменко В. М.** Методика експериментальних досліджень деформованого стану монолітного ребристого перекриття силосу / В. М. Адаменко // *Містобудування та територіальне планування*. - 2015. - Вип. 55. - С. 9-13.
 12. **Адаменко В. М.** Чисельне моделювання напружено-деформованого стану монолітного ребристого перекриття силосу / В. М. Адаменко // *Основи та фундаменти*. - 2015. - Вип. 36. - С. 48-56.
 13. **Адаменко В. М.** Дослідження впливу ефектів другого порядку на прикладі сталевого каркасу аеропорту / Адаменко В. М., Мавдюк А. М. // *Містобудування та територіальне планування*, 2020. - Вип. 72. - С. 176-186. DOI: [10.32347/2076-815x.2020.72.176-186](https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.72.176-186).
 14. **Адаменко В. М.** Досвід впровадження BIM-технологій в навчальний процес на кафедрі металевих і дерев'яних конструкцій КНУБА / Вячеслав Адаменко // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. - 2022. - Вип. 10. - С. 56-68. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.56-68>.
 15. **Timoshenko S.** History of strength of materials. With a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures / Stephen P. Timoshenko // *Dover Publications, Inc., New York*, 1953, 452 p.
 16. **Баженов В.А.** Варіаційні принципи будівельної механіки. Нариси з історії. / В.А. Баженов, А.В. Перельмутер, Ю.В. Ворона, В.В. Отрашевська - К.: *Каравела*, 2018. - 924 с.
 17. **Azhar S.** Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry / Salman Azhar // *Leadership and Management in Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 241-252, 2011, doi: [10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127).
 18. **Ghaffarianhoseini A.** Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges / Ali Ghaffarianhoseini, John Tookeya, Amirhosein Ghaffarianhoseini, Nicola Naismitha, Salman Azhard, Olia Efimovaa, Kaamran Raahemifar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 1046-1053, 2017, doi: [10.1016/j.rser.2016.11.083](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083).
 19. **Бензель О.** Інформаційне моделювання сталевих будівлі з підвищеними вимогами жорсткості / Олексій Бензель, Людмила Лавріненко // *Будівельні конструкції. Теорія і практика, КНУБА*, 2021, Вип. 09, с. 30-44. DOI: [10.32347/2522-4182.9.2021.30-44](https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44).
 20. **Budko T.** Structural Analysis and 3D Timber Spatial Structure Modeling / Tatiana Budko, Lyudmila Lavrinenko // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. - 2021. - Вип. 08. - С. 4-16. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.4-16>.

REFERENCES

1. **Eiffel G.** La Tour De Trois Cents Metres. Texte / Gustave Eiffel // *Societe Des Imprimeries Lemercier, Paris, 1900, Exemplaire № 96, 400 p.*
2. **Eiffel G.** La Tour De Trois Cents Metres. Planches / Gustave Eiffel // *Societe Des Imprimeries Lemercier, Paris, 1900, Exemplaire № 57, 288 p.*
3. **Ansaloni A.** Description of the Lifts in the Eiffel Tower / Mr. A. Ansaloni // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1889, Vol. 40, Issue 1, P. 350-378.* - Access Mode: https://doi.org/10.1243/pime_proc_1889_040_020_02.
4. **Origins and Construction** of the Eiffel Tower [Virtual Resource] / *Societe d'Exploitation de la Tour Eiffel (SETE), Eiffel Tower's official website.* - Access Mode: <https://www.toureffel.paris/en/the-monument/history> . - Date of Access: 26 July 2021.
5. **Henry A.** Singapore Sports Hub / A. Henry, C. W. Kam, C. Lewis, M. Smith, M. King, N. Boulter, P. Hoad, R. Wong, S. Munro, S. L. Ming // *The Arup Journal, 2015, Issue 1, P. 24-51.*
6. **Henry A.** Feature story: The Singapore Sports Hub / A. Henry, C. Lewis, M. King, M. Finlay, M. S. Chiang // *The Singapore Profile, Arup Singapore Pte Ltd, 2014, Issue 2, P. 2-21.*
7. **Hladik P.** Singapore National Stadium Roof / P. Hladik, C. J. Lewis // *International Journal of Architectural Computing, 2010, Volume 8, Issue 3, P. 257-277.* - Access Mode: <https://doi.org/10.1260/1478-0771.8.3.257>.
8. **Lewis C.** Designing the world's largest dome: the National Stadium roof of Singapore Sports Hub / Clive Lewis and Mike King // *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 2014, Volume 7, Issue 3, P. 127-150.* - Access Mode: <http://dx.doi.org/10.1080/19373260.2014.911485>.
9. **King M.** Application Of High Strength Niobium Grain-Refined Steels To A Re-Design Of The Singapore National Stadium Roof / M. King, W. Whitby, G. Hanshaw // *Proceedings of the Value-Added Niobium Microalloyed Construction Steels Symposium, CBMM (Brazilian Metallurgy and Mining Company) and TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), Singapore, 2015, P. 213-252.*
10. **Singapore SportsHub** [Virtual Resource] / *DP Architects, 2014, ArchDaily website.* - Access Mode: <https://www.archdaily.com/523365/singapore-sportshub-dparchitects> . - Date of Access: 31 July 2021.
11. **Adamenko V. M.** Metodyka eksperymentalnykh doslidzhen deformovanoho stanu monolitnoho rebrystoho perekryttia sylosu / V. M. Adamenko // *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia.* - 2015. - Vyp. 55. - S. 9-13.
12. **Adamenko V. M.** Chyselne modeliuвання napruzhenno-deformovanoho stanu monolitnoho rebrystoho perekryttia sylosu / V. M. Adamenko // *Osnovy ta fundamente.* - 2015. - Vyp. 36. - S. 48-56.
13. **Adamenko V. M.** Doslidzhennia vplyvu efektyv druhoho poriadku na prykladi stalevoho karkasu aeroportu / Adamenko V. M., Mavdiuk A. M. // *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia, 2020.* - Vyp. 72. - S. 176-186.
[DOI: 10.32347/2076-815x.2020.72.176-186](https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.72.176-186).
14. **Adamenko V. M.** Dosvid vprovadzhennia BIM-tehnolohii v navchalnyi protses na kafedri metalevykh i derevianykh konstruksii KNUBA / Viacheslav Adamenko // *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka* . – 2022. – Vyp. 10. – S. 56-68.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.56-68>.
15. **Timoshenko S.** History of strength of materials. With a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures / Stephen P. Timoshenko // *Dover Publications, Inc., New York, 1953, 452 p.*
16. **Bazhenov V.A.** Variatsiini pryntsyipy budivelnoi mekhaniky. Narysy z istorii. / V.A. Bazhenov, A.V. Perelmuter, Yu.V. Vorona, V.V. Otrashesvska – K.: *Karavella, 2018.* – 924 s.
17. **Azhar S.** Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry / Salman Azhar // *Leadership and Management in Engineering, vol. 11, no. 3, pp. 241-252, 2011, doi: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127* .
18. **Ghaffarianhoseini A.** Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges / Ali Ghaffarianhoseinia, John Tookeya, Amirhosein Ghaffarianhoseinib, Nicola Naismitha, Salman Azhard, Olia Efimovaa, Kaamran Raahemifar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 75, pp. 1046-1053, 2017,*
[Doi: 10.1016/j.rser.2016.11.083](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083) .

19. **Benzel O.** Informatsiine modeliuвання stalevoi budivli z pidvyshchenymy vymohamy zhorstkosti / Oleksii Benzel, Liudmyla Lavrinenko // *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, KNUBA, 2021, Vyp. 09, s. 30-44.

[DOI: 10.32347/2522-4182.9.2021.30-44](https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44).

20. **Budko T.** Structural Analysis and 3D Timber Spatial Structure Modeling / Tatiana Budko, Lyudmila Lavrinenko // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. – 2021. – Вип. 08. – С. 4-16.

<https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.4-16>.

DEVELOPMENT OF CALCULATION AND DETAILING METHODS OF STEEL BUILDINGS: FROM THE EIFFEL TOWER TO THE NATIONAL STADIUM OF SINGAPORE SPORTS HUB

Viacheslav ADAMENKO

Summary. From the analysis of the principles and methods of designing the world-famous Eiffel Tower, which at the time of its construction was the tallest tower in the world (312.12 m), and the National Stadium of Singapore sports hub, which is the largest steel dome in the world (diameter 310 m), the transformation of approaches to calculation and detailing of steel buildings was followed.

Based on the architectural, structural, organizational, technological and economic parts of the original project of the Eiffel Tower, the process of its design and construction is considered in detail. It is shown that the design and construction of the

tower was carried out with thorough theoretical preparation, extensive use of mathematical apparatus, manual calculations of all parts of the project, the use of railways, steam cranes and industrial production of parts of steel structures.

The sequence of project development and construction of the dome of the National Stadium of Singapore sports hub was analyzed, with the creation of a 3D parametric model, calculations using the finite element method, computer optimization of the shape and size of structural parts, programming of special modules and development of algorithms to ensure the compatible operation of various software complexes, and design, detailing, development of drawings, as well as the transfer of all necessary information to the metal construction plant, for their production on CNC machines, using 3D BIM information systems.

It was concluded that thanks to the development of information technologies, there was a transition from manual execution to the predominant use of computer methods of calculation and detailing of steel buildings.

Ways to improve the further development of methods and approaches to the calculation and detailing of steel buildings are proposed.

Keywords. BIM; BIM technologies; information modeling; 3D modeling; steel structures; computer methods of calculation; computer methods of detailing steel structures.

Стаття надійшла до редакції 01.11.22