



**ШИМАНОВСЬКИЙ**  
Олександр Віталійович — член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, генеральний директор ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського»

УДК 624.014

## СТВОРЕННЯ УНІКАЛЬНИХ ВЕЛИКОПРОГІННИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МЕХАНІКИ

За матеріалами наукової доповіді на засіданні  
Президії НАН України 18 листопада 2015 року

*Доповідь присвячено актуальним науково-технічним питанням проектування і будівництва великопрогінних конструкцій, над вирішенням яких фахівці ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського» працюють у тісному співробітництві з установами НАН України.*

**Ключові слова:** великопрогінні конструкції, навантаження, методи комп'ютерного моделювання.

Упродовж усієї історії будівництва просторові параметри споруд були мірилом рівня розвитку будівельного мистецтва. Кожен архітектор завжди прагнув вразити громадськість розмірами зведеної споруди. Наприклад, купол Пантеону в Римі (126 р.) має діаметр 44 м, купол Ая-Софія (собору Святої Софії Константинопольської) у Стамбулі (537 р.) — 32 м, а купол кафедрального собору Санта-Марія-дель-Фіоре у Флоренції (1436 р.) — 45 м. Ця тенденція зберігається і донині.

Відомо, що найбільш престижними і великопрогінними спорудами є мости. Найбільший із римських мостів, що збереглися до наших часів, — міст Траяна в Альконтарі (106 р.), довжина великого прогону якого у вигляді кам'яної арки становить 30 м, ширина — 8 м, а висота над рівнем річки Тахо — 52 м. Сучасні мости (як правило, висячі) мають значно більші прогони. Так, найдовший у Європі міст Великий Бельт (1998 р.) знаходиться в Данії. Він має довжину головного прогону 1624 м і загальну довжину 6790 м. А найбільший (принаймні на сьогодні) у світі — Великий міст протоки Акасі — було побудовано в Японії в 1998 р. Його загальна довжина становить 3911 м, а довжина головного прогону — 1991 м.

Однак повернемося до наших реалій. Першою значною спорудою, створеною нашими інженерами у співдружності з ученими Академії наук, був міський міст через р. Дніпро в Києві, названий ім'ям свого творця Євгена Оскаровича Патона. Це міст балкової конструкції, з суцільними головними балками двотаврового перетину довжиною 58 і 57 м, висотою 3,6 м, 26-прогінний, з опорами на кесонній основі. Прогінні споруди складаються з 264 однотипних блоків завдовжки 29 м, під час монтажу яких було зварено майже 11 км швів. Зазначимо, що міст ім. Є.О. Патона є першим у світі великим суцільнозварним мостом.

До 50-річчя з дня відкриття моста ім. Є.О. Патона Український інститут сталевих конструкцій (далі – Укрінсталькон) ім. В.М. Шимановського розробив проект його реконструкції із заміною залізобетонної плити на металеву ортотропну і з розширенням моста від нинішніх 27,16 м до 37,3 м для уможливлення організації восьми смуг автомобільного руху (рис. 1). Зараз цей проект перебуває в стадії реалізації.

Другим прикладом мостових споруд, створених у співпраці з Академією, є Парковий міст через р. Дніпро в Києві (рис. 2). Цей міст, візитна картка столиці, також створювався спільно з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона. За конструкцією це суцільнозварний

міст, зведений з використанням автоматичного зварювання. Загальна довжина моста – 429 м, основний прогін – 180 м, а ширина пішохідної частини – 7 м. Він складається з трьох центральних прогонів висячого типу і берегових ділянок балкової конструкції. Центральні прогони за схемою 60 + 180 + 60 м піднято над рівнем річки на 26 м, що забезпечує прохід суден навіть за найвищих рівнів води.

Третій приклад – це автодорожній проїзд через греблю ДніпроГЕС, реконструйований у 1978 р. за проектом Укрінсталькону ім. В.М. Шимановського. Проїжджу частину було розширено, і тепер дві смуги нависають над водою. Тут було реалізовано ідею коробчасті балки, що спирається на маятникові опори (рис. 3). Ортотропна плита проїжджої частини забезпечена системою перехресних ребер, не з'єднаних у місцях перетину. Така конструкція ортотропної плити потребувала вирішення проблем міцності та витривалості. Зараз проїжджа частина складається з чотирьох смуг, по дві в кожному напрямі руху.

До унікальних конструкцій належать також висотні споруди. Їх зведення завжди вважалося престижним. Класикою в цьому аспекті є Ейфелева вежа в Парижі, побудована в 1889 р. до всесвітньої виставки. У повоєнні роки у зв'язку з розвитком телебачення почалося ма-

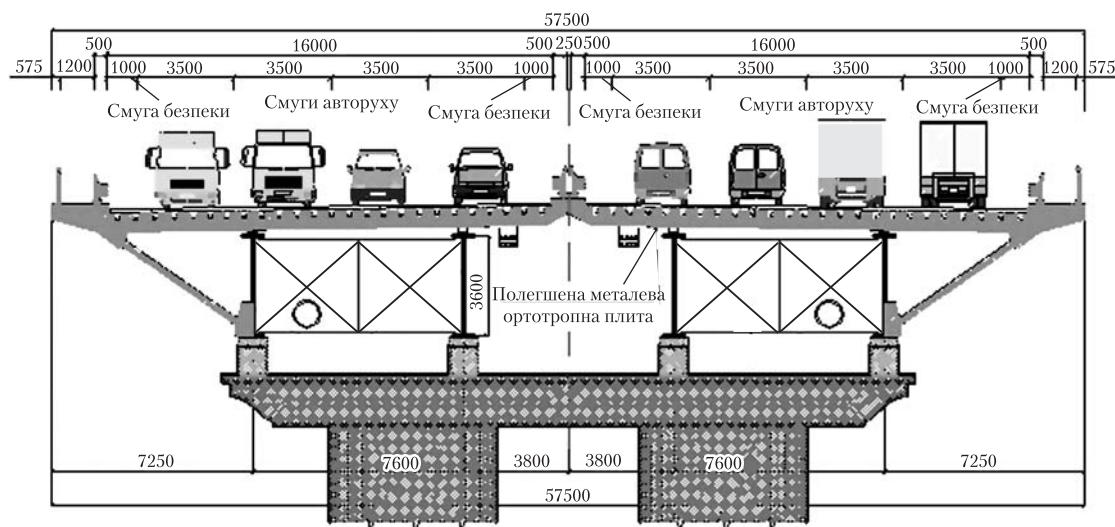


Рис. 1. Поперечний розріз мосту ім. Є.О. Патона після реконструкції



**Рис. 2.** Парковий міст через р. Дніпро в Києві



**Рис. 3.** Загальний вигляд автодорожнього проїзду через греблю ДніпроГЕС

сове будівництво телевізійних веж. Причому метал і залізобетон конкурували на рівних у цьому процесі. Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського був лідером у проектуванні металевих телевізійних веж у колишньому Радянському Союзі. За його проектами було побудовано телевізійні вежі в Ленінграді, Тбілісі, Єревані, Харкові та інших містах.

У 1967 р. Рада Міністрів УРСР ухвалила рішення про будівництво в Києві суцільно-зварної телевізійної вежі висотою 380 м. Проектування металоконструкцій було доручено колективу нашого Інституту, і вже традиційно створення такого важливого об'єкта виконувалося в тісній співпраці з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона. У результаті було запроєктовано гратчасту вежу з високоміцної сталі, з використанням трубчастих елементів,



**Рис. 4.** Телевізійна вежа у Києві

з'єднаних в стик за допомогою зварювання. Причому змонтовано її було методом підрушування (рис. 4). Висота київської телевежі становить 385 м, а маса металу, витраченого на її конструкцію, — 2738 т. Для порівняння, на Ейфелеву вежу висотою 316 м знадобилося 7300 т металу.

Мало хто знає, що протягом 36 років Київська вежа була найвищою сталевею телевежею у світі, і лише в 2010 р. цей рекорд перейшов до вежі заввишки 610 м, побудованої в Китаї у м. Гуаньчжоу. У 2012 р. в Токіо споруджено телевізійну вежу Sky Tree висотою 634 м. Зараз вона є найвищою металевею вежею у світі. Зазначимо, що витрати металу на вежі в Гуаньчжоу і Токіо настільки великі, що точні цифри тримають у таємниці. Отже, незважаючи на втрату першості, Київська телевізійна

вежа залишається видатною інженерною спорудою ХХ ст.

Раніше серед висотних споруд рекордсменами були залізобетонні вежі в Торонто (553,5 м), Москві (Останкіно, 540 м) та Шанхаї (468 м). Однак сьогодні найвищою спорудою світу є хмарочос «Бурдж Халіфа» у Дубаї висотою 828 м.

В останні роки колектив Укрінсталькону ім. В.М. Шимановського брав участь у проектуванні великопрогінних будівель промислового, цивільного та спеціального призначення. В установі накопичено значний досвід проектування спортивних споруд будь-якого ступеня складності. Це такі об'єкти, як стадіони «Донбас Арена» у Донецьку, ФК «Динамо» ім. В.В. Лобановського у Києві, ФК «Дніпро» у Дніпропетровську, ОСК «Металіст» у Харкові, СК «Металург» в Артемівську, СК «Ювілейний» у Сумах, спортивно-оздоровчий комплекс «Центр фристайлу» в Мінську, фізкультурно-спортивний комплекс «Олімп» у м. Южному Одеської області та багато інших.

У зв'язку з проведенням чемпіонату Європи з футболу 2012 р. в Україні було реконструйовано й побудовано сучасні стадіони. Першим великим стадіоном з критими трибунами, розрахованим на 52 667 глядачів, став футбольний стадіон «Донбас Арена», зведений у 2009 р. в Донецьку (рис. 5). Генеральним підрядником будівництва стадіону було обрано турецьку компанію Enka. Для проведення експертизи прийнятих проектних рішень щодо металевих конструкцій покриття над трибунами (в тому числі для оцінки механічних властивостей сталей імпортного виробництва і технологій їх зварювання), а також залізобетонних конструкцій трибун надземної частини було залучено Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського, який виконував ці роботи спільно з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона. Незважаючи на істотні розбіжності з українськими нормами проектування, необхідність адаптації та доопрацювання проекту з урахуванням вимог замовника, будівництво було завершено у заплановані терміни.

Стадіон НСК «Олімпійський» у Києві розрахований на 69 тис. глядачів, його площа



Рис. 5. Загальний вигляд стадіону «Донбас Арена» у Донецьку



Рис. 6. Фрагмент покриття над трибунами стадіону НСК «Олімпійський» у Києві

становить близько 60 тис. м<sup>2</sup>. Генеральний підряд на проведення реконструкції стадіону отримала ХК «Київміськбуд», а підряд на спорудження металевих конструкцій покриття над трибунами — завод «Майстер-Профі Україна». Виготовлення канатів та їх анкерних пристроїв для висячої конструкції покриття над трибунами стадіону здійснено компанією Bridon International Ltd (Велика Британія), а мембранно-тканинної системи — компанією Hightex GmbH (Німеччина). Проектування реконструкції стадіону НСК «Олімпійський» виконувала німецька компанія GMP von Gerkan, Marg und Partner з урахуванням стандартів УЄФА, що висуваються до подібних споруд. Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського було залучено до проведення експертизи прийнятих проектних рішень металевих конструкцій, розроблення проекту виконання робіт з їх монтажу, а також до виконання проекту і подальшого виготовлення стелів укрупнювального





**Рис. 7.** Загальний вигляд стадіону ОСК «Металіст» у Харкові



**Рис. 8.** Загальний вигляд стадіону «Динамо» ім. В.В. Лобановського у Києві

збирання колон і необхідного спеціального монтажного оснащення.

Найскладнішим і найвідповідальнішим елементом стадіону НСК «Олімпійський» є покриття над його трибунами з вильотом від 65 до 69 м і площею 48,5 тис. м<sup>2</sup>. Покриття має в плані вигляд овального кільця і є великопрогінною висячою двошаровою радіально-кільцевою системою (рис. 6). Загальне число канатів становить близько 3 тис., їх маса дорівнює 765 т, сумарна довжина досягає 40 км, а діаметр канатів коливається від 13 до 115 мм.

Ще одним визначним об'єктом є стадіон ОСК «Металіст» у Харкові, повністю запроєктований Укрінстальконом ім. В.М. Шимановського. Стадіон розрахований на 38,6 тис. глядачів, його площа становить близько 20 тис. м<sup>2</sup>. Найскладнішою спорудою тут також було по-

криття над трибунами з вильотом на 36 м і площею 24,86 тис. м<sup>2</sup>. Маса металевих конструкцій становила 3,5 тис. т. Каркас покриття вирішено у вигляді замкнутого опорно-підкроквяного контуру, що складається з V-подібних опорних стояків висотою 22,5 м, які спираються на залізобетонні фундаменти, і підкроквяних ферм висотою 6 м. На них, у свою чергу, спираються кроквяні ферми висотою 3 м (рис. 7). Вітрові навантаження на конструкції покриття визначалися обдуванням в аеродинамічній трубі двох варіантів масштабної моделі споруди. Експериментально було встановлено, що вітрові навантаження менші для варіанта без захисного екрана. Цей варіант і було реалізовано.

Стадіон «Арена Львів» у Львові було зведено заново. Він розрахований на 33 тис. глядачів. Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського брав участь у проектуванні, адаптації до українських будівельних норм та науково-технічному супроводі його будівництва. Інститут істотно відкоригував розроблену ТОВ «Гіпромез» схему конструкцій покриття з переходом на трубчасті ферми зі спареними поясами, що дало змогу знизити витрати металу з 6,5 до 4 тис. т.

Стадіон футбольного клубу «Динамо» ім. В.В. Лобановського розташований у центрі Києва, в міській парковій зоні поблизу Дніпра. Площа стадіону становить близько 32 тис. м<sup>2</sup>, а загальна площа забудови — 77 тис. м<sup>2</sup> (рис. 8).

Генеральне проектування реконструкції стадіону виконав Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського. Консольний навіс-козирок над трибунами виконано у вигляді підвісної системи — одноконсольної над північно-західними і двоконсольної над південно-східними трибунами. Цей навіс запроєктовано із застосуванням криволінійних балок з перфорованою стінкою. По всіх криволінійних балках каркасної системи консольного навісу-козирка над трибунами укладено прогони і світлопрозоре покриття з полікарбонатних листів, що надає конструкції практично «невагомому» вигляду і дозволяє вдало поєднати вражаючі архітектурні характеристики з необхідними експлуатаційними властивостями. Цей проект зараз перебуває на стадії реалізації.

Стадіон «Дніпро» у Дніпропетровську для однойменного футбольного клубу розташований на місці старого стадіону «Металург». Генеральний підряд на його будівництво отримала німецька будівельна компанія Hochtief Aktiengesellschaft, а більшість проектних і будівельних робіт виконали українські організації. Генеральним проектувальником стадіону було архітектурне бюро «Ю. Серьогін», а проектування металевих конструкцій навісу-козирка над трибунами виконував Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського. Трибуни стадіону розраховані на 31 тис. глядачів.

Стадіон має консольний навіс-козирок над трибунами, виліт якого досягає 30 м, а площа — 22 тис. м<sup>2</sup> (рис. 9). Покриття такого масштабу належать до розряду унікальних просторових систем і виконуються, як правило, з легких металевих конструкцій. У цьому випадку для навісу-козирка використали консольно-фермову конструктивну схему, яка вдало поєднує архітектурно-естетичні та експлуатаційні властивості.

Серед промислових споруд варто відзначити комплекс з перевантаження сірки у м. Усть-Луга. Інститутом було запроєктовано метало-конструкції комплексу. Прогін споруди — 69 м, висота — 43 м, довжина — 247 м, маса метало-конструкцій — 2052 т. Конструкції було виготовлено на Броварському заводі метало-конструкцій, який входить до структури Інституту.

Далі детальніше розглянемо деякі нестандартні завдання, що виникають у процесі наукового супроводу проектування та будівництва великопрогінних будівель і споруд.

Відомо, що навантаження і впливи на великопрогінні об'єкти часто відрізняються від навантажень, що регламентуються будівельними нормами. Наприклад, нагромадження снігу мають своєрідний характер і сильно залежать від форми споруди. Оскільки сніг здувається вітром і відкладається лише на частині покриття об'єкта, незважаючи на загальну тенденцію зниження сумарного навантаження, посилюється ефект нерівномірного його розподілу. Крім того, в разі наявності великого похилу покриття споруди сніг під час відлиги



Рис. 9. Загальний вигляд стадіону «Дніпро» у Дніпропетровську

може лавиноподібно зісковзнути вниз, пошкоджуючи на своєму шляху виступи будівлі. Падіння снігу з даху може становити небезпеку для розміщених внизу споруд, техніки і людей. Ось тому і постає потреба у розв'язанні задачі про сходження снігової лавини з покриття.

Для моделювання цього процесу використовували модель ідеалізованого сипкого середовища, склали диференціальні рівняння руху й виводили всі необхідні формули. При цьому вважали, що в процесі руху масиву снігу його окремі елементи набувають різної швидкості, тому кутові розміри збільшуються, а погонна маса, відповідно, зменшується. У разі досягнення будь-яким елементом снігового покриття певного граничного значення швидкості відцентрова сила, що діє на нього, стає рівною нормальній складовій сили тяжіння, внаслідок чого елемент виходить з контакту з поверхнею покрівлі і далі здійснює вільне падіння по балістичній траєкторії. При падінні на наземну перешкоду сніг чинить на неї ударну дію, яка для безперервного снігового потоку проявляється як змінний у часі тиск.

За вказаною методикою на основі методів комп'ютерного моделювання отримано результати розрахунків кінематичних і динамічних характеристик процесу сходження снігової лавини з покриття та її впливу на покрівлю і прилеглі об'єкти. За результатами чисельних розрахунків побудовано графіки, що характеризують значення швидкостей елементів снігового масиву, нормального і дотичного компонентів тиску снігу в процесі його ковзання по покрівлі, дальності горизонтального руху снігу і шматків льоду після падіння; розміри замету снігу і величину його тиску на вертикальну стіну.

Інша задача, пов'язана з обтіканням повітряним потоком циліндра (труби) поблизу плоского шорсткого екрана (стіни будівлі), досить часто виникає при проектуванні висотних споруд. Як правило, труба зазнає деформаційного впливу стіни, разом з якою вона переміщується, впливу вітру, смерчу, сейсмічних навантажень, температури. Обтікання потоком вітру труби, що стоїть окремо, добре відоме. У цьому випадку спостерігається періодичне виникнення вихорів, які можуть розхитати трубу. У разі ж розміщення труби поруч зі стіною характер її обтікання вітровим потоком заздалегідь не відомий.

Цю задачу було розв'язано методом математичного моделювання з використанням мультифізичного програмного комплексу. Задача виявилася дуже об'ємною, оскільки кількість скінченних елементів обчислювалася десятками тисяч. Це пов'язано з тим, що взаємодія набігаючого повітряного потоку з тілом, по суті, відбувається через примежовий шар, який утворюється поблизу поверхні тіла і має складну структуру. Тому для правильного опису всіх явищ на розрахунковій сітці за товщиною шару має бути передбачена достатня кількість вузлів. З віддаленням від тіла, що обдувається, розміри сітки поступово збільшуються, досягаючи на кінцях розрахункової області розмірів, зіставних з розмірами самого тіла.

Для налагодження обчислювального процесу спочатку розв'язували відому задачу для відокремленого циліндра. Розрахунки виконували за допомогою розв'язання системи нестационарних рівнянь Нав'є—Стокса. Потім тим самим методом і за тієї самої щільності скінченно-елементної сітки було розв'язано задачу про циліндр біля шорсткого екрана. Причому динаміка цього процесу відрізняється від уже розглянутого лише кількісно.

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання вітрових впливів на відсік труби дав змогу сформулювати такі висновки:

- впливи на трубу мають чітко виражений турбулентний нестационарний характер;
- коефіцієнт лобового опору труби, розміщеної поблизу стіни, має більші значення порівняно з трубою, що стоїть окремо;

- значення коефіцієнта лобового опору перебувають у межах від 0,50 до 0,75;

- за однакових режимів обтікання амплітуда коливань коефіцієнта бічної сили для труби, розміщеної поблизу стіни, має більші значення порівняно з трубою, що стоїть окремо;

- значення коефіцієнта бічної сили перебувають у межах від  $-0,90$  до  $0,30$ . Середнє значення коефіцієнта бічної сили змінюється від  $-0,20$  до  $-0,27$  залежно від заданого швидкісного режиму. Причому знак «мінус» у значеннях коефіцієнта бічної сили означає, що сила, з якою вітровий потік діє на трубу впоперек течії, спрямована від стіни.

Ще одна задача пов'язана з тим, що зі збільшенням прогонів просторових споруд та подальшим зростанням навантажень виникає необхідність у нових конструктивних рішеннях вузлових з'єднань, зокрема болтових з'єднань просторових трубчастих ферм, у яких розміри перерізу елементів можуть досягати 800 мм, а товщини — 30 мм. Поведінку таких вузлів під навантаженням вивчено мало, тому було вирішено провести скінченно-елементний розрахунок деталей типового вузла ферми з урахуванням пружно-пластичних деформацій.

Скінченно-елементна схема конструкції вузла містить 15 795 скінченних елементів, 11 109 вузлів і 59 934 шукані вузлові переміщення. У розрахунках враховували, що ребра сполучені з накладками болтовими з'єднаннями, і крім визначення загального напружено-деформівного стану системи встановлювали сили, що передаються на кожний із болтів. Результати розрахунку свідчать про те, що процес деформування поділяється на дві стадії. На першій він відповідає силі  $N < 6099,4$  кН, і робота з'єднання відбувається в пружній стадії без істотних деформацій. Далі настає пластична стадія роботи (напруження Мізеса мають значення 355 МПа), і деформації зростають. При цьому значення поздовжньої сили вже становить  $N = 13723,5$  кН, а втрата стійкості відбувається з добре помітними випинаннями стінки труби.

Дослідження розподілу зусилля між болтами показало, що практично все зусилля сприймається крайніми рядами болтів, а середні ряди болтів

майже не беруть участі в роботі. Тому, конструюючи такі з'єднання, слід уникати багаторядних болтових з'єднань як недостатньо ефективних.

На завершення зауважимо, що розвиток обчислювальної техніки і наявність програмних комплексів, здатних розв'язувати задачі великого обсягу, по суті, привели до того, що проблему визначення напружено-деформованого стану будівельних конструкцій можна вважати практично вирішеною. Втім, зважаючи на значну вартість великопрогінних будівель і споруд, а також на недостатню вивченість певних видів навантажень на них, є ще багато аспектів, які потребують додаткових досліджень.

Так, вітрові навантаження на великі поверхні будівлі, як правило, нижчі від нормованих, проте в місцях зламів поверхні будівлі спостерігається концентрація швидкостей атмосфери і концентрація вітрового навантаження. Такого роду особливості вітрових навантажень і дотепер вивчені недостатньо.

Будинки і споруди, пошкодження яких становить техногенну чи екологічну небезпеку,

крім традиційних навантажень, варто розраховувати ще й на маловивчені впливи торнадо, які не лише спричиняють розрідження повітря, а й переносять важкі предмети. Удари цих предметів можуть завдати шкоди огорожувальній конструкції. Такі впливи потребують подальших статистичних досліджень.

Є також специфічні особливості розрахунку великопрогінних споруд на сейсмічні навантаження, пов'язані з необхідністю врахування неодночасності впливу сейсмічної хвилі на опори споруди, які розміщені, як правило, далеко одна від одної.

Небезпеку становлять і температурні впливи на відкриті споруди. Тому проблема визначення нагріву окремих частин споруди під дією прямої сонячної радіації є актуальною.

Недостатньо дослідженими залишаються також задачі формоутворення конструкцій. До того ж їх слід розглядати в поєднанні з проблемами механіки та завданнями естетики. Добре відомо, що правильно спроектована конструкція буде водночас гармонійною і красивою.

*А.В. Шимановский*

ООО «Украинский институт стальных конструкций им. В.Н. Шимановского» (Киев)

СОЗДАНИЕ УНИКАЛЬНЫХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МЕХАНИКИ

По материалам научного доклада на заседании Президиума НАН Украины 18 ноября 2015 г.

Доклад посвящен актуальным научно-техническим вопросам проектирования и строительства большепролетных конструкций, над решением которых специалисты ООО «Украинский институт стальных конструкций им. В.Н. Шимановского» работают в тесном сотрудничестве с учреждениями НАН Украины.

**Ключевые слова:** большепролетные конструкции, нагрузки, методы компьютерного моделирования.

*A.V. Shimanovsky*

LLC «V. Shimanovsky Ukrainian Institute of Steel Construction» (Kyiv)

CREATION OF UNIQUE LONG-SPAN CONSTRUCTIONS  
WITH THE USE OF MODERN METHODS OF MECHANICS

According to materials of scientific lecture at the meeting of Presidium of NAS of Ukraine November 18, 2015

A lecture is devoted to the pressing scientific and technical questions of planning and building of long-span constructions, on the decision of which specialists of LLC «V. Shimanovsky Ukrainian Institute of Steel Construction» work in a close collaboration with establishments of NAS of Ukraine.

**Keywords:** long-span constructions, loading, methods of computer design.