

О. В. Шимановський, В. М. Гордєєв, О. І. Кордун

**НОВИЙ БЕЗПЕЧНИЙ КОНФАЙНМЕНТ.
ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ТА ЗАДАЧІ МЕХАНІКИ***

*Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського,
вул. Віталія Шимановського, 2/1, 02125, Київ, Україна; e-mail: gor@urdisc.com.ua*

Abstract. This paper examines technical solutions implemented during the construction of the New Safe Confinement (NSC) to evaluate, generalize, and integrate them into the design of future unique structures. The study examines new mechanical problems formulated and solved to ensure the structural reliability of this unprecedented engineering facility, providing recommendations for their further application. Furthermore, the paper discusses the deficiencies in the technical solutions of the enclosing structures revealed by explosion-induced damage to the New Safe Confinement. Reflections on the repair strategies and the feasibility of fully restoring the protective functions of this specific facility are presented.

Key words: New Safe Confinement, snow avalanche, aerodynamic load, resilience, solar radiation, blast damage, fire damage, restoration of containment.

Вступ.

На сьогодні вже майже 40 років минуло відтоді, як на Чорнобильській атомній електростанції вибухнув ядерний реактор 4-го енергоблоку, спричинивши найбільшу в світі техногенну катастрофу [5]. Шляхом самовідданого героїзму і ціною життів працівників станції, пожежників, медиків та інших осіб, більшість із яких отримала смертельні дози радіації, цю катастрофу було приборкано. У надзвичайно стислі строки було побудовано тимчасове укриття, так званий Саркофаг (рис. 1), який ізолював залишки ядерного реактора від навколишнього середовища [3, 9, 21].

Оскільки цей Саркофаг був недосконалим і потребував повсякчасного ремонту й зміцнення, то все вказане врешті-решт призвело до згуртування кращих світових спеціалістів і відпрацювання ними концепції перетворення Саркофагу в екологічно безпечну систему за допомогою Нового безпечного конфайнмента** (НБК) (рис. 2) – унікальної споруди, під захистом якої з часом планувалось не тільки провести демонтаж самого Саркофагу, а й добути і видалити залишки радіоактивних речовин [3, 8, 9, 12, 15, 22].

Відомо, що позаяк будівельний майданчик цієї споруди знаходився поряд із Саркофагом (на відстані приблизно 300 м), то після зведення вона була насунута на місце

* Стаття підготовлена за матеріалами доповіді 15 травня 2025 р. на Спеціалізованому науковому семінарі в Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України та за безпосередньою порадою директора Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, академіка НАН України, д. т. н., професора В.М. Назаренка.

** Просимо шановного читача не плутати конфайнмент із контайнментом. Конфайнмент – технічна система або конструкція, яка утримує радіоактивні речовини всередині реактора або сховища, запобігаючи їхньому витоку в навколишнє середовище. А контайнмент – герметична оболонка реактора, яка є останнім фізичним бар'єром для стримування радіоактивних речовин у разі аварії. Вона витримує механічні, теплові та хімічні навантаги, зокрема при втраті теплоносія або розплавленні активної зони.



Рис. 1



Рис. 2

розташування 4-го енергоблоку Чорнобильської атомної електростанції у 2017 році. Після чого, здавалося б, можна хоч тимчасово дозволити собі заспокоїтись.

Однак не так трапилося, як гадалося. А саме: у лютому 2025 року увага людей всього світу знову була прикута до Чорнобильської катастрофи. А причиною цього стало вибухове пошкодження НБК московитським безпілотним літальним апаратом. Як вбачається з рис. 2, НБК зовні виглядає як масивна металева споруда, яка з погляду обивателя мала б витримати атаку безпілотного літального апарата. Але дійсність виявилася іншою. Це відбулося тому, що проєктувальники НБК, розрахувавши його на безліч різноманітних факторів, зокрема: дію високого снігу, снігової лавини, ураганного вітру, небувалого землетрусу, впливу потужного торнадо, не передбачили, що він може зазнати бомбардування.

У цій статті автори повертаються до часів створення НБК, його концептуальних основ, особливостей конструктивного рішення, до незвичних задач механіки, які виникли в процесі проектування та будівництва, і до методів, за допомогою яких ці задачі було розв'язано. Приділено також увагу нещодавньому вибуховому пошкодженню НБК і можливості його ремонту та відновлення.

1. Передісторія.

1.1. Призначення і функції конфайнмента. Завдання НБК визначено так: створення додаткових захисних бар'єрів проти поширення радіоактивних речовин; створення умов для демонтажу чи посилення нестабільних конструкцій існуючого укриття;

забезпечення відкладеного видалення радіоактивних матеріалів та перетворення об'єкта на екологічно безпечну систему.

1.2. Створення конфайнмента. Фінансував проєкт European Bank for Reconstruction and Development (Сполучене Королівство Великої Британії і Північної Ірландії), який оголосив тендер на проектування, будівництво та введення в експлуатацію НБК для Чорнобильської атомної електростанції у березні 2004 року.

Його переможцем у серпні 2007 року був визнаний консорціум «Novarka Construction Company», спільне підприємство компаній «VINCI Construction Grands Projets S.A.S.» і «Bouygues Travaux Publics S.A.S.» (обидві – Французька Республіка). Консорціум розробив загальний проєкт і виконав більшість підрядних робіт.

Робочий проєкт і виготовлення тримальних металоконструкцій виконав завод «Simolai S.p.A.» у м. Порденоне (Італійська Республіка).

Кранове обладнання запроектувала і виготовила фірма «PAR Technology Corporation» (Сполучені Штати Америки).

Оболонки вкомплектувала й змонтувала фірма «Oceanus Grup» (Турецька Республіка).

Пересунула НБК із монтажною зоною в проєктне положення (в сервісну зону) фірма «Mammoet Ferry Transport (UK) B.V.» (Королівство Нідерланди).

Усі механічні розрахунки виконало бюро конструкційних проєктів «Jaillet Roubu» (Французька Республіка) за допомогою комп'ютерної програми HERCULES.

Проєкт металевих конструкцій вентиляційної труби НБК і науково-технічний супровід виконав Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського.

Маса сталевих конструкцій НБК склала 25 тис. т., а його загальна маса разом із обладнанням сягає 36,2 тис. т.

НБК був пересунутий у проєктне положення у 2017 році і введений в експлуатацію у 2019 році.

Загальна вартість НБК перевершила 2 млрд. Євро.

1.3. Науково-технічний супровід. Згідно з законодавством України, проектування, виготовлення і монтаж конструкцій НБК мали відповідати вимогам Державних будівельних норм (ДБН) та Державним стандартам (ДСТУ) України. Оскільки спеціалісти консорціуму «Novarka Construction Company» у своїй роботі використовували Єврокоди, у практичній діяльності було задіяно консервативне правило: конструкції конфайнмента одночасно мають відповідати і українським нормативним документам і Єврокодам.

Контроль за дотриманням відповідності сталевих конструкцій конфайнмента ДБН України виконував Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. Першою роботою цього напрямку було зіставлення ДБН України та Єврокодів, а другою – моніторинг ДБН і ДСТУ.

На ранніх етапах проектування французька сторона практикувала регулярні спільні технічні наради, на яких українські і французькі спеціалісти обговорювали принципові технічні рішення, включаючи вимоги до них із боку ДБН України. Ця діяльність була корисною як французькій стороні, бо полегшувала їй вивчення і дотримання ДБН, так і українській стороні, бо поглиблювала її знайомство з західною практикою проектування будівельних металевих конструкцій.

Робоче проектування тримальних конструкцій відбувалося на заводі металевих конструкцій «Cimolai S.p.A.». Там постійно перебували два українських інженери, які перевіряли кресленики конструкцій до того, як вони передавалися у виробництво. Одночасно інститут отримував досвід виготовлення металевих конструкцій, особливо важких трубчастих конструкцій, які в Україні виготовити неможливо через брак механічного устаткування.

Проте цим науково-технічний супровід проектування НБК не обмежувався. Важливою складовою частиною супроводу було виконання дублювальних механічних розрахунків. Як вже зазначалося вище, первинні механічні розрахунки були виконані бюро конструкційних проектів «Jaillet Rouby» за допомогою комп'ютерної програми HERCULES. А з українського боку для виконання розрахунків було обрано обчислювальний комплекс SCAD [1, 20].

Скінченноелементна модель НБК складалась із 14027 вузлів і 36570 елементів.

Дублювальні розрахунки охоплювали статичні розрахунки для таких розрахункових навантаж:

власна вага конструкцій;

сніг (характеристичне значення 1,59 кПа, граничне – 1,813 кПа);

вітер (характеристичне значення 0,540 кПа, граничне – 0,620 кПа);

кранове обладнання (4 крани з вантажопідйомністю 50 тонн);

торнадо класу 1,5 і торнадо класу 3,0 [7, 19] (запроектна дія: максимальна колова швидкість – 81 м/с, максимальний перепад тиску – 810 кгс/м²).

Були виконані динамічні розрахунки на сейсмічний вплив: сейсміка 6 балів за макросейсмічною шкалою MSK-64 і сейсміка за акселерограмою.

Була виконана перевірка поперечних перерізів елементів від розрахункових навантаж за нормами України.

Була виконана перевірка поперечних перерізів на міцність і стійкість під дією навантаж від власної ваги та торнадо класу 3,0. Виявилось, що в даному випадку велика кількість елементів не відповідала вимогам ДБН і їх підібрали заново. Перепідбирання перерізів елементів викликало ітераційний процес, який спинився після 17 ітерацій.

Крім того, була поставлена і розв'язана задача про сходження снігової лавини.

Було виконано детальне нелінійне дослідження вузлових з'єднань трубчастих елементів методом скінченних елементів і внесено, в окремих випадках, корективи.

Українські спеціалісти ознайомились з профільованими конструкціями фірми «Kalzip GmbH» у м. Кобленц (Федеративна Республіка Німеччина), які згодом були використані для зовнішньої і внутрішньої оболонки НБК.

Українські спеціалісти брали участь у розробці програми випробувань обшивки конфайнменту на впливи вітрових і снігових навантаж і на зісковзування снігової лавини та падіння льодової брили в науково-дослідному центрі «CERAM» у м. Сток-он-Трент (Сполучене Королівство Великої Британії і Північної Ірландії) й у випробуванні елементів кріплення в Технологічному інституті у м. Карлсруе (Федеративна Республіка Німеччина).

Вкажемо також на те, що під час виготовлення конструкцій на заводі «Cimolai S.p.A.» представники інституту, постійно перебуваючи там, перевіряли деталювальні кресленики на відповідність українським нормам і здійснювали нагляд за виготовленням і відвантаженням металевих конструкцій. А у випадку виявлення неминучих транспортних пошкоджень конструкцій на майданчику будівництва інститутом надавалися рекомендації щодо їх усунення.

2. Особливості конструкції Нового безпечного конфайнмента.

Конфайнмент має форму частини циліндра з діаметром 280 м і прогоном 257,4 м, 108,9 м заввишки і 165 м завдовжки (див. рис. 2), який має дві умовно герметичні оболонки – зовнішню і внутрішню. Величезні габарити споруди, особливо її прогін 257,4 м, схилиють інженера до думки, що її основою є тримальні конструкції. Проте

ознайомлення з технологією перетворення залишок 4-го енергоблоку Чорнобильської атомної електростанції і забруднених конструкцій Саркофагу в екологічно безпечну систему свідчить про те, що більш важливими у складі конфайнмента є огорожувальні конструкції.

2.1. Конфайнмент як фільтро-вентиляційний пристрій. Доречно звернути увагу читача на те, що конфайнмент тільки на перший погляд має монументально-монолітний вигляд. Насправді ж – це напрочуд тендітна споруда постійно працюючого фільтро-вентиляційного агрегату, яка перешкоджає викиду небезпечних речовин у навколишнє середовище. Заради здійснення цього задуму конфайнмент поділений на два умовно герметичні відсіки: внутрішній і кільцевий. Внутрішній – це той, де знаходяться зруйнований реактор і Саркофаг. А кільцевий – це той, де містяться конструкції арок між зовнішньою і внутрішньою оболонками (рис. 3, на якому будівля Саркофагу виділена затемненням).

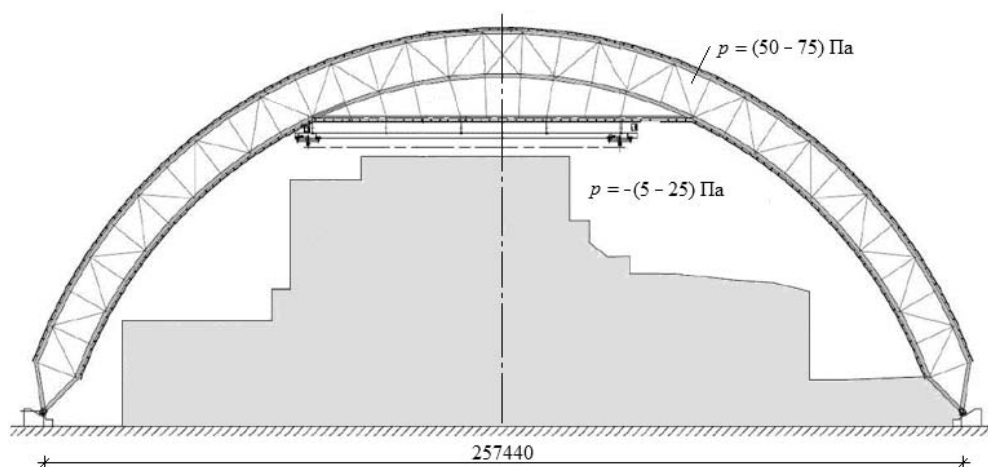


Рис. 3

У внутрішньому відсіку підтримується невелике розрідження $p = -(5 - 25)$ Па завдяки тому, що спеціальний компресор видаляє з нього надлишки повітря крізь систему фільтрів у вентиляційну трубу. У кільцевому відсіку навпаки підтримується надлишковий тиск $p = (50 - 75)$ Па задля того, щоб шкідливий вміст внутрішнього відсіку не міг вийти назовні крізь нещільності внутрішньої оболонки. З цією метою компресори використовують зовнішнє повітря, яке додатково проходить стадію кондиціонування: воно зневоложується і підігрівається на декілька градусів до температури, вищої ніж точка роси. Тримальні конструкції, знаходячись у кільцевому відсіку, тим самим будуть захищені від корозії і слугуватимуть необхідні 100 років.

2.2. Огорожувальні конструкції. Огляд особливостей влаштування конфайнмента, природно, почнемо з його огорожувальних конструкцій. Зауважимо, що найбільш складною є зовнішня оболонка конфайнмента, схема якої наведена на рис. 4, де числами позначено: 1 – елемент арки; 2 – прогін; 3 – оцинкований профнастил; 4 – Ω -подібний профіль; 5 – неіржавіюча сталь; 6 – клямер; 7 – утеплювач завтовшки 50 мм; 8 – мембранна гермооболонка з еластичного гідроізоляційного матеріалу на основі синтетичного етилен-пропілен-дієн-мономера (EPDM) каучуку; 9 – термоізоляція; 10 – м'який утеплювач; 11 – мастика; 12 – силіконова мастика; 13 – закатаний стик; 14 – напускний стик. Зовнішня оболонка об'єднує в собі і огорожувальні функції і тримальні – щодо місцевих навантаж. Її водонепроникність забезпечує облицювання з нержавіючої сталі, а теплозахисні функції – три шари утеплювача, волого- і повітря-непроникність – шар із EPDM-мембрани.

Тримальні функції виконує оцинкований профнастил, Ω -подібний профіль, а також клямери та зовнішнє облицювання з неіржавіючої сталі, особливо важливі для сприйняття від'ємного тиску вітру та торнадо.

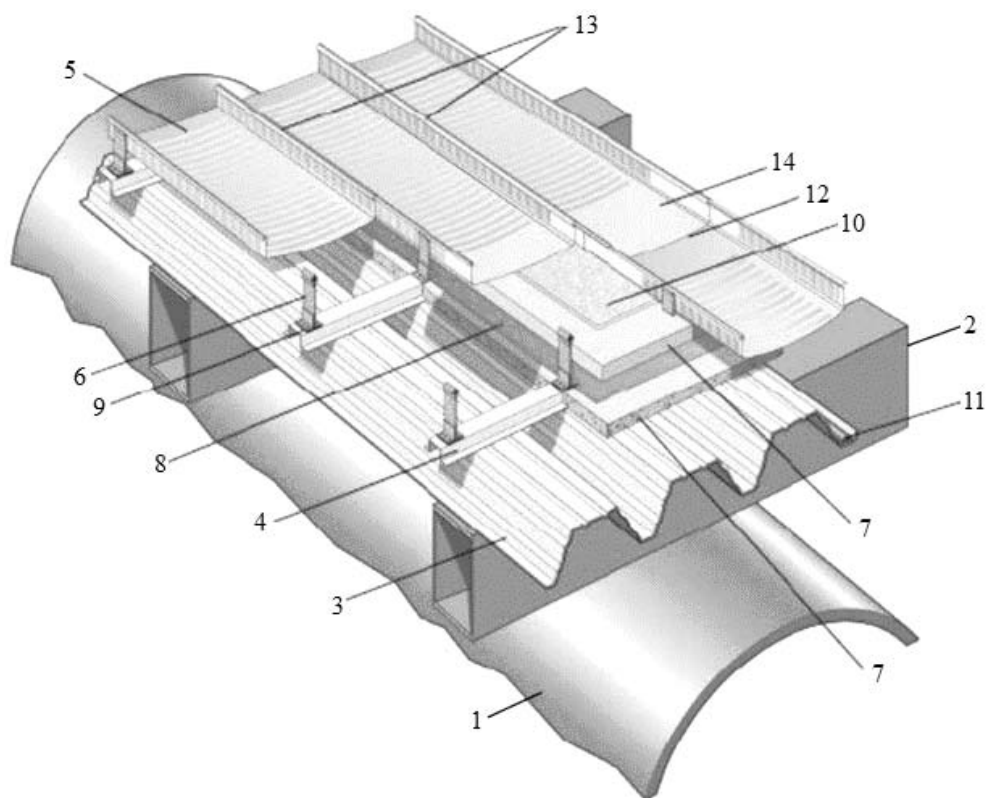


Рис. 4

Простіше виглядає внутрішня оболонка, структура якої наведена на рис. 5, де числа означають те ж саме, що й на попередньому рисунку, і лише числом 15 позначена колія інспекційного візка. Внутрішня оболонка значно простіша за зовнішню. Вона не має EPDM-мембрани. А її герметичність забезпечують пластини з неіржавіючої сталі, ущільнені мастикою. Власну вагу і надлишковий тиск сприймає легкий оцинкований профнастил.

Герметизації оболонок консорціум «Novarka Construction Company» приділяв значну увагу. Внаслідок цього технічні рішення експериментально перевірялись двічі в різні періоди часу в лабораторіях науково-дослідного центру «CERAM». На рис. 6 представлено загальний вигляд експериментальної установки для перевірки герметичності зовнішньої оболонки з клямерами, пригвинченими крізь EPDM-мембрану, а на рис. 7 – експериментальної установки для перевірки герметичності внутрішньої оболонки. Забігаючи трохи наперед слід зазначити, що EPDM -мембрана через свою горючість проявила себе з гіршого боку після пошкодження конфайнмента безпілотним літальним апаратом.

2.3. Тримальні конструкції. Передусім вкажемо на те, що тримальні конструкції конфайнмента виготовлені з європейської сталі класу S355, а загальна витрата металу склала близько 15000 т. Поза тим, було прийнято рішення повністю відмовитися від зварювання на складальному майданчику і перейти до фрикційних з'єднань на болтах із попереднім натягом.

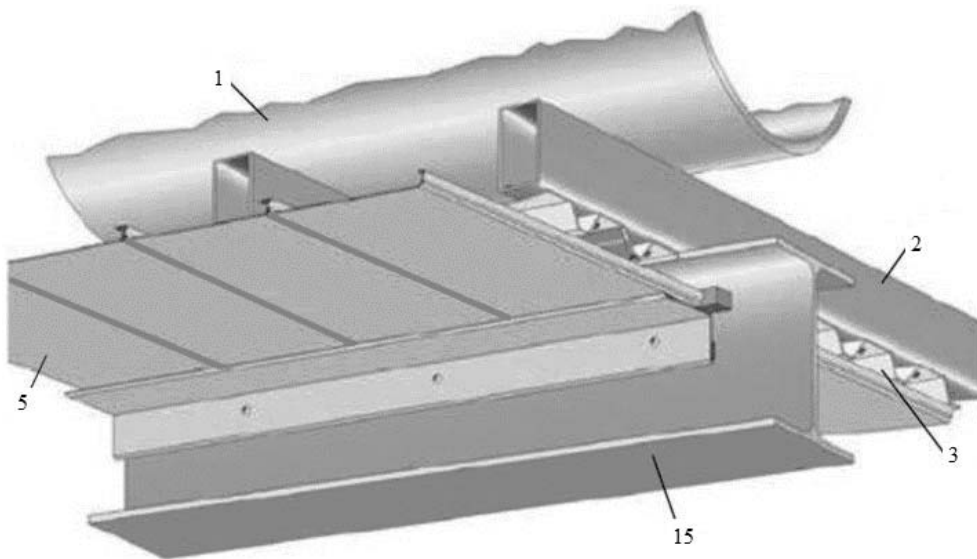


Рис. 5



Рис. 6

Тримальні конструкції захищено від корозії багатошаровим лакофарбовим покриттям, розрахованим на довгострокову службу. Вони повністю занурені в кільцевий простір. Цей простір вентильовується, а його температурний режим унеможливує утворення конденсату. За цих умов загальний термін експлуатації НБК становитиме щонайменше 100 років.

Схема металевого каркасу споруди (в одну лінію) показана на рис. 8, фрагмент верхньої частини споруди (в тілі) під час контрольного збирання – на рис. 9.



Рис. 7

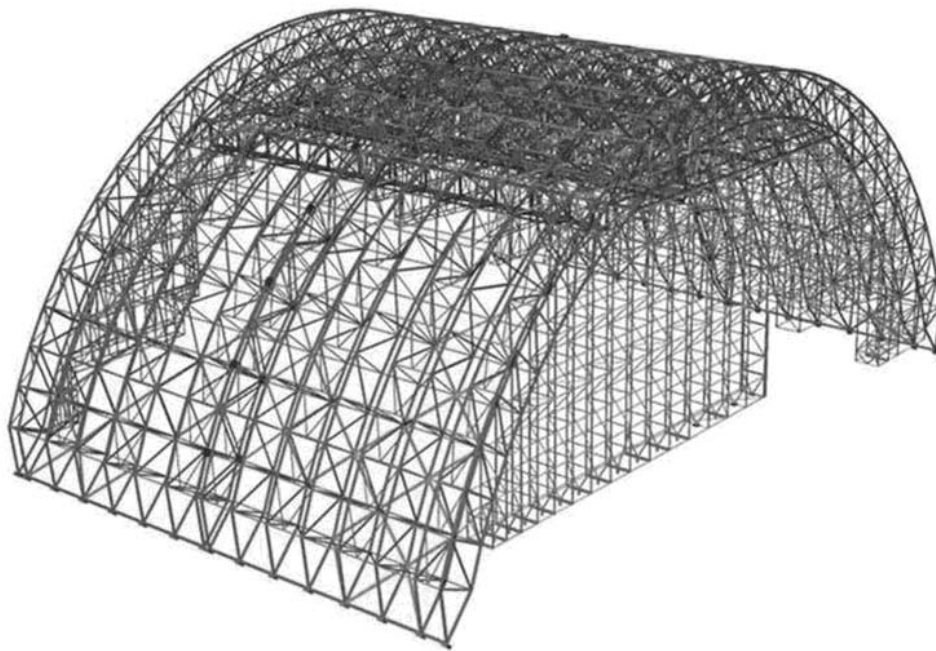


Рис. 8

Продовжуючи, звернемо увагу на те, що всі елементи тримальних конструкцій виконано з електрозварних труб із діаметрами до 813 мм із стінками завтовшки до 50 мм. Також варто особливо підкреслити, що готові труби не замовлялися, а виготовлялися; при цьому кожен трубчастий елемент виготовлявся виключно індивідуально. З цією метою на заводі «Сімолаї S.p.A.» використовувався спеціальний цех, оснащений унікальним пресом із робочою шириною 15,1 м і зусиллям на ніж 6000 тс (рис. 10). Прес згинає плоский лист, надаючи йому форму труби. Потім ця заготовка зварюється автоматичним поздовжнім швом із підваренням кореня та надходить для подальшої обробки (рис. 11).



Рис. 9

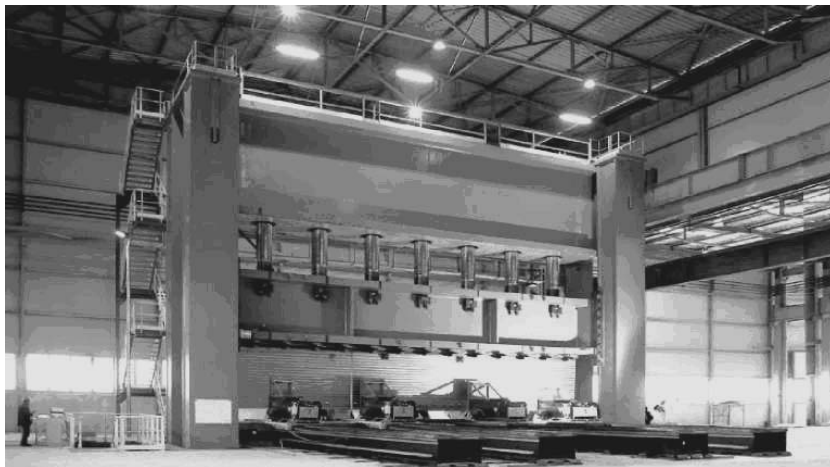


Рис. 10

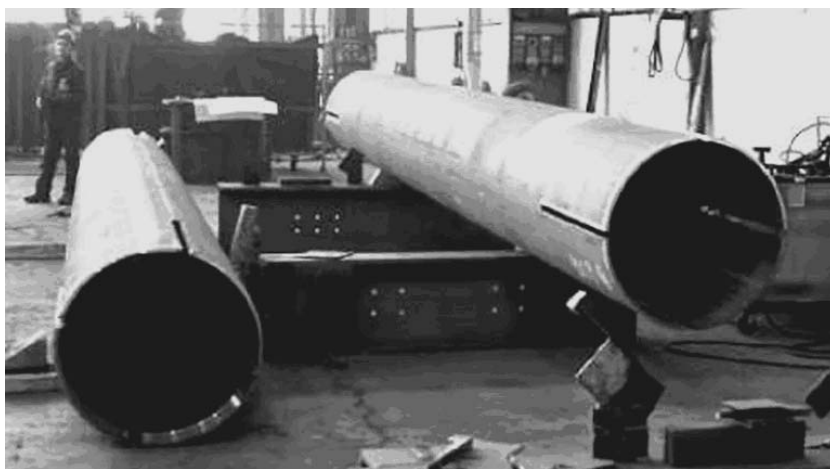


Рис. 11

Вузли з'єднання трубчастих елементів виконано однотипно. Кінці елементів об'єднуються листовими вставками (рис. 12), які приєднуються до вузлових фасонки (рис. 13) накладками (рис. 14) за допомогою болтів із попереднім натягом. Болти за-гвинчують контролюючи натяг, завдяки чому зусилля від елемента до вузла передається за рахунок тертя між накладками і листовими вставками з одного боку та вузловими фасонками – з другого.



Рис. 12



Рис. 13

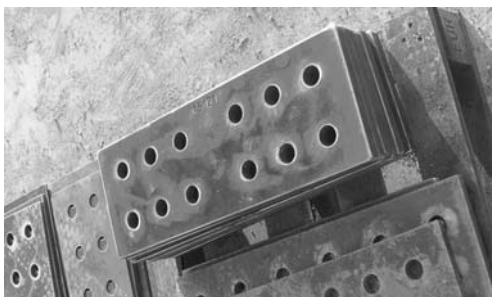


Рис. 14



Рис. 15

Контролювання натягу здійснюється напрочуд просто шляхом застосування спеціальних болтів (рис. 15) [2]. Простота ж пояснюється тим, що болт цієї конструкції має на кінці рифлений хвостовик, а гайку за-гвинчують спеціальним апаратом, утримуючи болт за нього. Причому міцність хвостовика підібрана у такий спосіб, що він одразу зрізується як тільки зусилля натягу болта досягає проектного значення. І ця ознака, тобто відсутність хвостовика на за-гвинченому болті, є свідченням того, що болт за-гвинчений і належним чином натягнутий.

Майже усі вузли металевих конструкцій НБК виконано подібним чином, а деякі їх приклади у зібраному вигляді (під час контрольного збирання) зображено на рис. 16, 17.



Рис. 16



Рис. 17

2.4. Особливості монтажу конструкцій. Процес монтажу НБК докорінно відрізняється від зведення будь-яких промислових і громадських споруд, навіть визначних. Пояснити ж цю відмінність можна тим, що вона викликана двома основними факторами. По-перше, НБК має грандіозні розміри та складну конструктивну схему і, по-друге, він знаходиться в зоні радіоактивного забруднення, де праця людей неприпустима. Через це було прийнято концептуальне рішення: збирання та монтаж конструкцій, встановлення мостових кранів й іншого обладнання, а також налагодження всіх систем виконувати виключно на ділянці, віддаленій приблизно на 300 м від зруйнованого реактора, з подальшим насунанням готової споруди на місце її постійного розташування. Внаслідок цього територія будівництва була розділена на монтажну, транспортну та сервісну зони.

Роботи передусім почалися з розчищення та підготовки монтажної зони і демонтажу існуючих неексплуатованих споруд. Далі з метою влаштування фундаментів глибокого закладення були підготовлені дві широкі траншеї. Задля запобігання розповсюдженню радіоактивних відходів земляні роботи в монтажній зоні площею близько 90 тис. м² були зведені до мінімуму. Ба більше, для додаткового радіаційного захисту персоналу монтажна зона була засипана чистим матеріалом завтовшки в середньому 1 м і вкрита бетонними плитами, які стали монтажним майданчиком і основою для підйомних веж, за допомогою яких здійснювалося збирання укрупнених фрагментів конструкцій.

Монтаж конструкцій НБК відбувся в наступній послідовності. Перші сегменти конструкції, попередньо зібрані за межами монтажної зони, доставлялися на майданчик на багатоколісних платформах. Кожен сегмент мав масу близько 300 тонн і висоту приблизно 25 м.

Зведення безпосередньо арки почалося з її верхньої частини. Сегменти були з'єднані між собою проміжними в'язями, утворивши центральну частину, на яку потім кріпилося зовнішнє облицювання. Після цього доставлялися наступні елементи, які приєднувалися до центральної частини за допомогою системи шарнірів (рис. 18).



Рис. 18

Перший підйом був здійснений за допомогою монтажних веж, які дозволяють підіймати вантажі з масою близько 1000 тонн (рис. 19). Поступово конструкція доповнювалася іншими елементами. Відтак підйомні вежі переміщалися на нову позицію для монтажу елементів, які слугуватимуть основою арки (рис. 20) і був здійснений другий підйом, а за ним монтаж супутніх конструкцій.

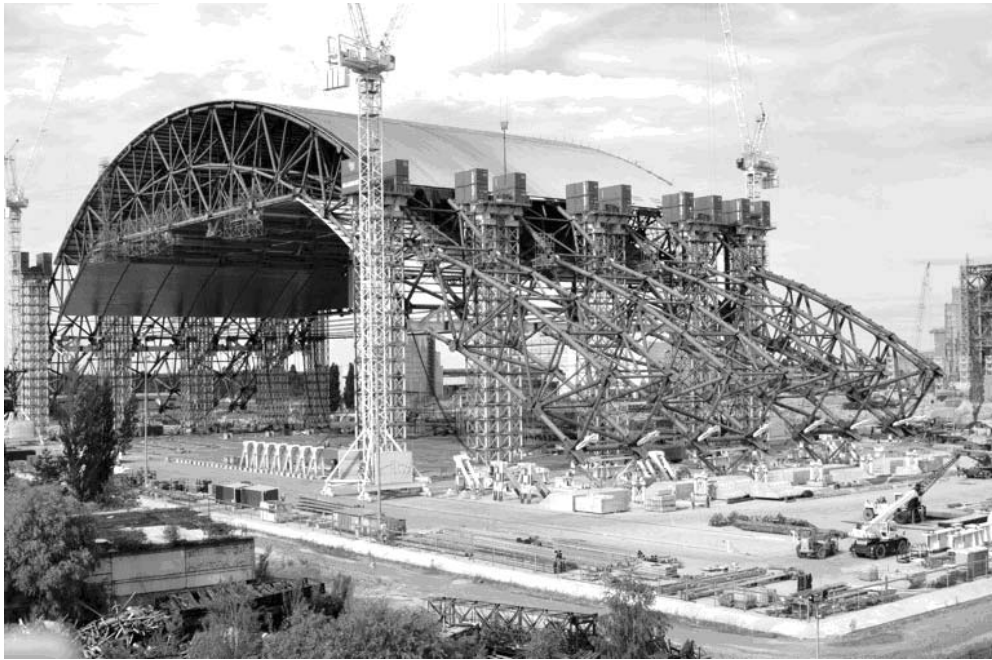


Рис. 19



Рис. 20

У такій послідовності була змонтована східна половина арки. Після чого були встановлені спеціальні гідравлічні домкрати фірми «Mammoet Ferry Transport (UK) V.V.», один такт роботи яких забезпечував переміщення на 600 мм. Такими кроками східна половина арки була переміщена в зону очікування (рис. 21), звільнивши монтажну зону (рис. 22).



Puc. 21



Puc. 22

Друга (західна) половина арки була зібрана так само, як і східна. Відмінності полягали лише в частині монтажу східної та західної стін, конструкції яких суттєво відрізняються. Після монтажу другої половини арки перша половина була переміщена у зворотному напрямку і пристикована до західної половини, завершивши монтаж трипальної конструкції (рис. 23).



Рис. 23

В останню чергу були змонтовані просторові в'язі та завершена металева обшивка. Об'єднана конструкція залишилася на монтажному майданчику, де були виконані роботи з монтажу конструкцій східної та західної стіни, вентиляційної труби, мостових кранів та іншого обладнання.

НБК оснащений унікальними мостовими кранами, виготовленими за проектом компанії «PAR Technology Corporation» і призначеними для демонтажу конструкцій Саркофагу та зруйнованого реакторного блоку. Їх зібрали на землі, а потім підняли за допомогою лебідок на висоту 85 м.

Після завершення всіх робіт і проведення попередніх випробувань конфайнмент був переміщений на 327 м у проектне положення за допомогою гідродомкратів. При цьому використовувалась технологія насування, яка вже була апробована під час з'єднання двох половин НБК. Насування здійснювалося зі швидкістю 10 метрів на годину, проте оскільки процес робіт передбачав технологічні перерви, то воно тривало близько двох тижнів.

Важлива проблема полягала в забезпеченні щільного стику між східною стіною конфайнмента та існуючими конструкціями. Для її вирішення на східній стіні було застосовано оригінальне рішення у вигляді спеціальних відкидних панелей, яке вперше реалізовувалось на такому великому та відповідальному об'єкті. Під час насування відкидні панелі були підняті на висоту, що забезпечувала зазор у 500 мм над найвищою перешкодою (рис. 24), а їх установку у проектне положення здійснено за допомогою монтажних лебідок і системи вертикальних та поперечних домкратів, встановлених під час складання НБК.



Рис. 24

Після насування арки та встановлення панелей у проектне положення по всій довжині контакту між існуючими спорудами та новозведеними конструкціями залишено проміжок завширшки приблизно в 1 метр – достатній для компенсації максимальних взаємних переміщень між НБК і цими конструкціями. Заповнення цього проміжку здійснено за допомогою поліуретанових герметизувальних мембран.

І нарешті на прикінцевому етапі процесу монтажу, який тривав протягом одного року, було виконано остаточні роботи: герметизацію, монтаж допоміжних приміщень та обладнання, і в грудні 2017 року НБК було введено в дослідно-промислову експлуатацію. Це – найбільша з будь-коли переміщених наземних споруд (рис. 25). Загальна маса конструкцій цієї споруди становить 36200 тонн.



Рис. 25

2.5. Основи і фундаменти. Технологія поетапного збирання і насування НБК зумовила особливості конструктивних рішень фундаментів. На рис. 26 показано схеми фундаментів у трьох умовних зонах – монтажній (1), транспортній (2) та сервісній (3). Для встановлення монтажних веж, які добре видно на рис. 18, передбачено окремі фундаменти, які на рис. 26 позначено цифрою 4.

Фундамент транспортної зони симетричний відносно осі арки, має ширину 10,5 м і довжину 121,81 м без ділення на температурні блоки.

Забивні палі фундаменту монтажної зони виконано зі сталевих труб діаметром 1016 мм завдовжки 24 м. Палі об'єднані бетонними ростверками завширшки 8,5 м і завдовжки 209,91 м, розділених на три температурних блоки.

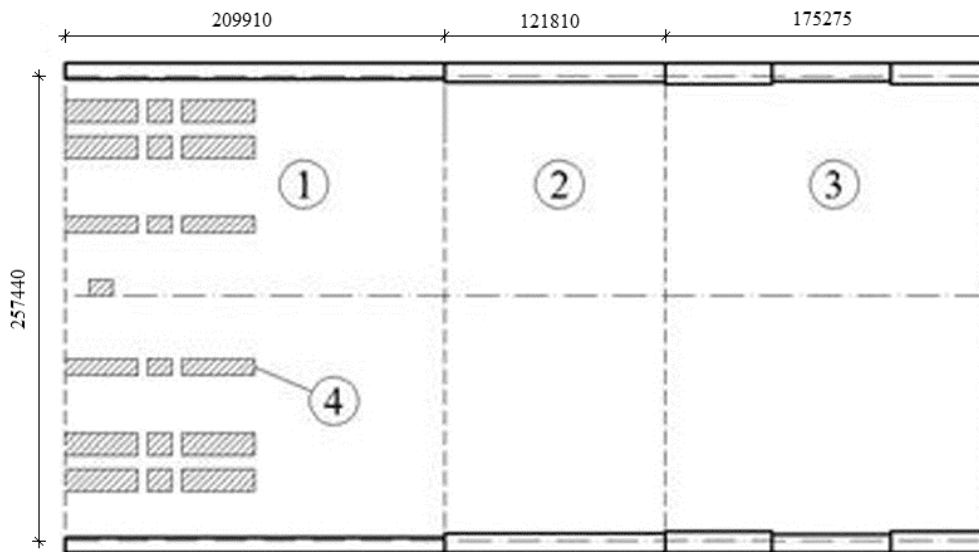


Рис. 26

Фундамент сервісної зони НБК виконаний із буроін'єкційних палів діаметром 1,0 м завдовжки 19 м. Палі розміщені не симетрично відносно осі симетрії арки, що зумовлено наявністю важливих підземних мереж. Для південної смуги фундаменту використано 184 палі, а для північної – 192 палі. Палі сполучені двома ростверками завдовжки по 175,275 м, симетричними відносно осі арки. Кожен ростверк розділено на три деформаційні блоки. Зовнішні блоки завширшки по 11,5 м об'єднують 4 ряди палів, а внутрішні – 10,0 м об'єднують 3 ряди палів. Поперечний переріз ростверку має вигляд рівносторонньої трапеції з похилою гранню під кутом 33° до горизонту, висота ростверку змінна в межах від 2 м до 4 м (рис. 27). Таке рішення дозволяє ефективно розподіляти та сприймати опорні реакції від арки.

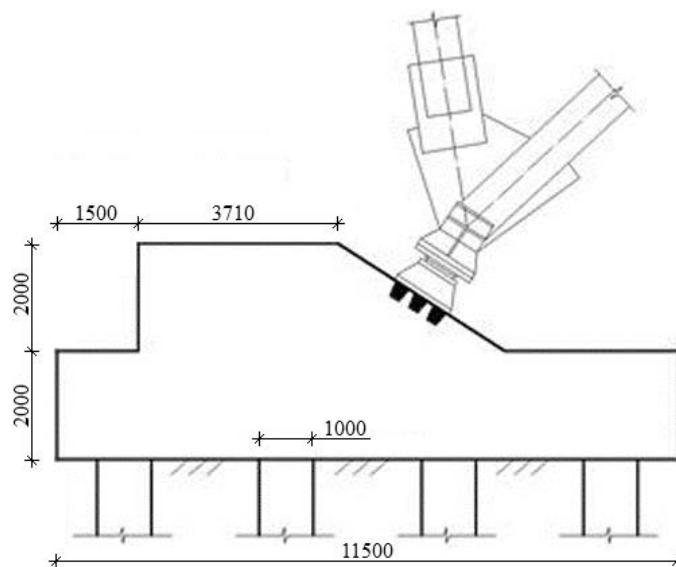


Рис. 27.

Різниця осідання фундаментів різних зон під час насування арки незначна і компенсувалася домкратами системи насування НБК.

3. Задачі механіки.

Створення споруди НБК було пов'язане з постановкою і розв'язанням низки важливих непересічних і часом неочікуваних механічних задач, які виникли під час проектування.

Задача 1. Сходження снігової лавини.

Статична навантага від снігу на арковій покрівлі. Методика обчислення статичного розподілу снігу на аркових покриттях викладена в нормах [4], в яких на покрівлях кругового обрису прийнято враховувати симетричний розподіл снігу та несиметричний. Проте для такої унікальної та відповідальної арконої споруди як НБК для розрахунку було додатково враховано випадки, за яких сніг залишався тільки на одній половині арки з огляду на перенесення вітром, танення або зісковзування. Внаслідок цього всього розглянуто сім варіантів розподілу навантаг від снігу при характеристичному значенні снігової навантаги для майданчика ЧАЕС із періодом повторюваності 50 років 1,6 кПа та з періодом повторюваності 100 років – 1,81 кПа. А динамічний ефект від сходження снігової маси з покрівлі арки НБК враховано коефіцієнтом динамічності, рівним 1,1.

Небезпека від сходження снігової лавини. Для об'єктів масового будівництва проблема сходження з покрівлі маси снігу зазвичай не актуальна зважаючи на малий ухил і наявність парпетів. Проте відомі випадки руйнування парпетів від раптового сходження снігу, а також випадки падіння снігових брил на автомобілі і навіть на людей. Отже для споруди типу конфайнмента з крутим схилом покрівлі ця проблема значно актуальніша, оскільки гладка зовнішня поверхня покрівлі арки НБК потенційно може призвести до раптового сходження снігу. Вказана раптовість пояснюється тим, що під впливом сонця або внутрішнього тепла сніг на покрівлі буде танути і створювати водяну плівку в зоні контакту снігу і металеві покрівлі. В таких умовах брили снігу можуть почати зісковзувати, зтягаючи з собою сусідні блоки і поступово створюючи лавину. Поза тим ще одна причина виникнення лавини полягає в тому, що вертикальні поздовжні ребра покрівлі сприяють накопиченню снігу, але не можуть запобігти його зісковзуванню. Все перелічене призвело до доцільності розгляду чотирьох груп небезпек, зокрема від:

виникнення динамічної ударної навантаги від сповзаючої маси снігу об виступаючі елементи даху;

удару по людях і об'єктах, які знаходяться неподалік від НБК;

скатної (тангенціальної) складової сили від снігу на покрівлі з врахуванням нерівномірного зчеплення снігу з покрівлею;

впливу динамічної нормальної навантаги на покрівлю від сходження рухомих мас снігу і шматків льоду.

Математичні моделі дослідження сходу снігової лавини. Під час дослідження руху снігу з покрівлі розглянуто два випадки, перший з яких становить пухкий сніговий масив. У цьому разі шар снігу рухається впорядковано, а елементи масиву мають незначний вплив на інші елементи. З метою моделювання такого масиву використана модель ідеалізованого незв'язного сипкого середовища. А друга можлива ситуація зводиться до того, що сніг злежався і змерзся, перетворившись на масивну льодяну брилу з непередбачуваними розмірами.

Для моделювання обох розглянутих випадків сходу снігової лавини використано модель руху твердого тіла. Геометрична схема снігового сипкого масиву на початковому етапі розрахунку наведена на рис. 28. Під час руху снігу його різні частини набирають різні швидкості. Після досягнення i -тим елементом деякої граничної швидкості відцентрова сила інерції досягає значення нормальної складової сили тяжіння і елемент виходить із контакту з поверхнею покрівлі вільно падаючи по балістичній траєкторії. Геометрична схема снігового масиву в момент відділення першого елемента масиву від поверхні покрівлі наведена на рис. 29.

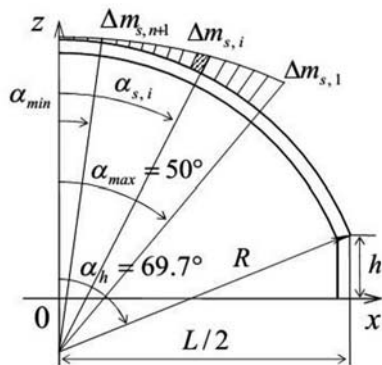


Рис. 28

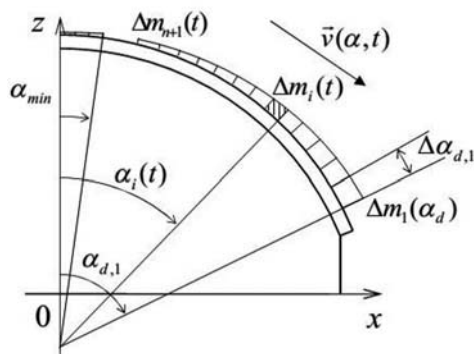


Рис. 29

Моделювання динаміки руху злежаного суцільного масиву снігу виконувалось за тією ж методикою, але в даному випадку розглядався суцільний шматок снігового масиву з розмірами суттєво меншими за геометричні розміри споруди. Завдяки цьому шматок снігу можна розглядати як тверде тіло, обертальним рухом якого можна знехтувати і вважати, що рух тіла повністю задано рухом його центра мас.

Результати моделювання.

Сніговий масив обох моделей змодельовано 101 точкою. Моделювання виконано для чотирьох коефіцієнтів тертя снігу по сталевій покрівлі – від 0,0 до 0,3.

Розрахунком визначено наступні дані:

1. Зміну за часом снігової навантаги на елементи арки.
2. Час досягнення кожною точкою снігового масиву поверхні землі.
3. Швидкість кожної точки масиву під час удару об землю. Максимальне значення швидкості 45 м/с для коефіцієнту тертя 0,0 і 40 м/с для коефіцієнту тертя 0,3.
4. Погонна ударна сила об поверхню (для розрахунку захисних бар'єрів).
5. Небезпечна зона розкидання снігу по поверхні – від 2 м до 16 м.

За результатами розрахунку передбачено і реалізовано окрему зону для розміщення снігової лавини з бар'єром необхідної висоти та міцності.

Задача 2. Аеростатичні навантаги.

Розрахунки звичайних будівельних конструкцій на аеродинамічні дії інтуїтивно зрозумілі й звичні для інженера-будівельника – вітер, торнадо, вибухова хвиля, які є проявами руху повітря, викликають значні навантаги на споруду і завжди враховуються проектувальниками. Аеростатичні ж навантаги, викликані повітрям, що знаходиться в спокої (на зразок тих навантаг, що піднімають у повітря аеростат), для великих споруд є незначними і до уваги не беруться. Зовсім інша справа, коли розміри повітронепроникної споруди великі, складають сотні метрів. Тоді вага великого об'єму повітря, що знаходиться всередині споруди, може частково передаватися на споруду і помітно впливати на напружений стан конструкцій. Навантажує конструкції великих споруд і тяга, яка виникає, якщо повітря у витяжній трубі є теплішим у порівнянні з повітрям внутрішнього середовища споруди. Ще більш помітним є вплив тиску повітря, яке знаходиться в герметичному або в майже герметичному просторі. Приміром, знижений тиск повітря у закритій цистерні, який виникає внаслідок її охолодження, часто-густо призводить до втрати стійкості й руйнації цистерни.

НБК відноситься до споруд, де всі ці явища майже спостерігаються. Тому корисно буде оцінити вплив кожного з них.

Аеростатика герметичних просторів.

Конфайнмент має два умовно геометричних відсіки: внутрішній і кільцевий (рис. 3). У внутрішньому відсіку підтримується невеликий вакуум $p = -(5-25)$ Па. У кільце-

вому відсіку навпаки підтримується надлишковий тиск $p = (50 - 75)$ Па. Завдяки цьому найбільш навантаженою виявляється внутрішня оболонка конфайнмента, яка складається з профнастилу і обшивки з нержавіючої сталі 0,5 мм завтовшки (рис. 5) і сприймає різницю тисків. Як випливає з даних про тиск у відсіках, результуючі навантаги на внутрішню оболонку складають $75 \text{ Па} - (-25) \text{ Па} = 100 \text{ Па}$, що для тонкої обшивки з нержавіючої сталі є доволі суттєвим.

Аеростатика приміщень із витяжною трубою.

Конфайнмент має вентиляційну трубу. Орієнтовно і конфайнмент і труба досягають висоти 100 м. Труба розташована на західній стіні і нагрівається прямими променями сонця у другій половині дня. Влітку температура труби і повітря в ній може досягати 50°C в той час, як всередині конфайнмента температура повітря становить 25°C . Коли вентиляційна система не працює і шлюзові двері зачинені, тиск всередині конфайнмента буде нижчим, ніж назовні за рахунок різниці в щільності повітря всередині труби і всередині конфайнмента.

Щільність повітря γ є функцією абсолютного тиску p і температури T у градусах Кельвіна ($^\circ\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,15$):

$$\gamma = \frac{\mu P}{RT}, \quad (1)$$

де $\mu = 0,0288$ кг/моль – молярна маса повітря; $p = 101325$ Па – нормальний атмосферний тиск; $R = 8,31$ Дж/(К·моль) – універсальна газова стала.

Відповідно до формули (1) щільність повітря для температур 50°C і 25°C у кг/м³ буде такою:

$$\gamma_{50} = \frac{0,0288 \cdot 101325}{8,31 \cdot (50 + 273,15)} = 1,0867; \quad \gamma_{25} = \frac{0,0288 \cdot 101325}{8,31 \cdot (25 + 273,15)} = 1,1778.$$

Стовпи повітря заввишки 100 м із площею поперечного перерізу 1 м^2 в середині труби і в середині конфайнмента матимуть такі маси: $M_{50} = 108,67$ кг; $M_{25} = 117,78$ кг, а різниця між зовнішнім тиском і тиском всередині конфайнмента складатиме:

$$D = 117,78 - 108,67 = 9,11 \text{ кгс/м}^2 = 89,37 \text{ Па};$$

$$\Delta = 117,78 - 108,67 = 9,11 \text{ кгс/м}^2 = 89,37 \text{ Па}.$$

Отже ця різниця тисків має той самий порядок, що й різниця тисків, обумовлена вентиляційною системою НБК.

Аеростатика приміщень із отвором.

Досить незвичним є аеростатична навантага, викликана лише тим, що щільність повітря всередині приміщення відрізняється від щільності зовнішнього повітря. Здавалося б, для зберігання газу зі щільністю, відмінною від щільності навколишнього повітря, потрібна герметична споруда. Однак, це твердження не відповідає дійсності. Оскільки, якщо внутрішня порожнина споруди сполучена з зовнішнім середовищем тільки на одному рівні, обмін повітря практично відсутній. Проте величина і навіть знак аеростатичної навантаги залежить від того, на якому рівні знаходиться отвір у споруді.

Уявімо собі споруду у вигляді купола (рис. 30) із отвором на рівні h_0 . Зрозуміло, що на рівні отвору внутрішній і зовнішній тиски однакові. А на інших рівнях внутрішній тиск на купол можна визначити за формулою:

$$p = (\gamma_{\text{в}} - \gamma_{\text{н}})(h_0 - h)g, \quad (2)$$

де $\gamma_{\text{в}}$ – щільність повітря всередині купола; $\gamma_{\text{н}}$ – щільність повітря зовні купола; h_0 – рівень отвору; h – рівень, на якому визначають тиск; g – прискорення сили тяжіння.

Додатний знак p свідчить про те, що тиск спрямований зсередини назовні. Щільність повітря як функція тиску й температури визначають за формулою (1).

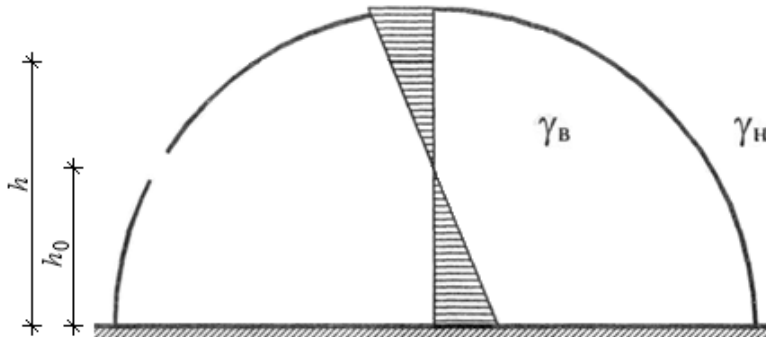


Рис. 30

У зв'язку з аеростатичною навантагою доречно розповісти про аварію одного з найбільших куполів у світі – покриття випробувальної зали Всесоюзного енергетичного інституту з діаметром 237 м і заввишки 119 м (рис. 31), який був розташований поблизу м. Істри [11].

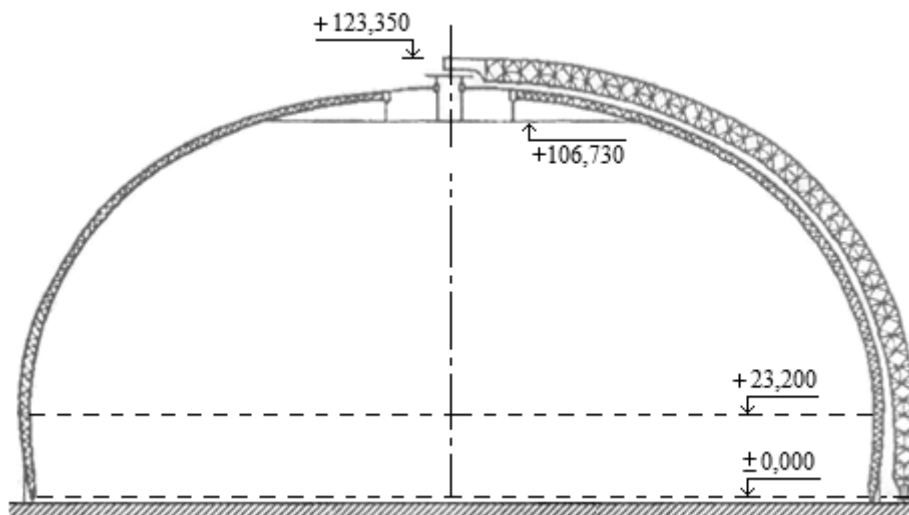


Рис. 31

На початку 1985 року металеві конструкції купола, включаючи дві обшивки й утеплювач, були змонтовані. Всередині купола виконувались оздоблювальні роботи. А 25 січня 1985 року о 7 годині 30 хвилин купол зруйнувався.

Як виявилось, неочікуване та доволі миттєве обвалення було спровоковано зміною погоди, оскільки у січні 1985 року були сильні морози з температурою $-25 \div 30^\circ\text{C}$, а напередодні обвалення настала відлига. Всередині утепленого купола залишалося морозяне повітря, а зовні – принесене південними вітрами повітря з нульовою температурою. Внутрішній об'єм купола сполучався з зовнішньою атмосферою на рівні землі через відчинені ворота.

Перепад температури, який спостерігався перед обваленням, якраз і звернув увагу спеціалістів на існування аеростатичної навантаги, не врахованої під час проектування будівель.

Уявімо, що купол зсередини був би наповнений теплим повітрям. За законами аеростатики купол, як дирижабль, намагався б злетіти. Насправді ж була зворотна ситуація. Під куполом зібралося холодне повітря і на поверхню купола почала діяти довантага такого ж порядку, як і підйомна сила. Розмір цієї довантаги можна оцінити, скориставшись формулами (1) і (2). А саме, прийнемо температуру зовнішнього повітря 0°C, а внутрішнього – 25°C і вважатимемо, що на рівні відчинених воріт, тобто на рівні 12 м, є нормальний тиск. Щільність зовнішнього і внутрішнього повітря за таких умов, відповідно, дорівнює:

$$\gamma_0 = \frac{0,0288 \cdot 101325}{8,31 \cdot 273,15} = 1,2856; \quad \gamma_{-25} = \frac{0,0288 \cdot 101325}{8,31 \cdot (273,15 - 25)} = 1,4151.$$

Аеростатичний тиск на вершині купола, визначений за формулою (2), складає:

$$p = (1,4151 - 1,2856) \cdot (12 - 119) \cdot 9,81 = -135,932 \text{ Па.}$$

Отримане значення – більше, ніж 10% власної ваги покриття. Проте така навантага сама по собі викликати аварію не могла, але в сукупності з іншими факторами виявилася однією з її причин.

Задача 3. Аеродинамічні навантаги.

Обтікання конфайнмента в цілому.

Обтікання вітровим потоком будівель є складним процесом, який формалізовано у нормах тільки для типових будівель простої геометричної форми і невеликих розмірів. Тому вплив вітру на споруду НБК вирішили дослідити експериментально в аеродинамічній трубі. Для цього в масштабі 1: 400 виготовили плексигласову модель конфайнмента, оснащену великою кількістю датчиків тиску (рис. 32), і моделі Саркофага та сусідніх будівель. Модель НБК була розбірною, щоб можна було досліджувати конфайнмент як у завершеному вигляді, так і в монтажних станах. Дослідження було виконано в одній з дев'яти аеродинамічних труб найбільшого у Французькій Республіці будівельного науково-технічного центру (Scientific and Technical Center for Building (CSTB)), розташованому в м. Нант.

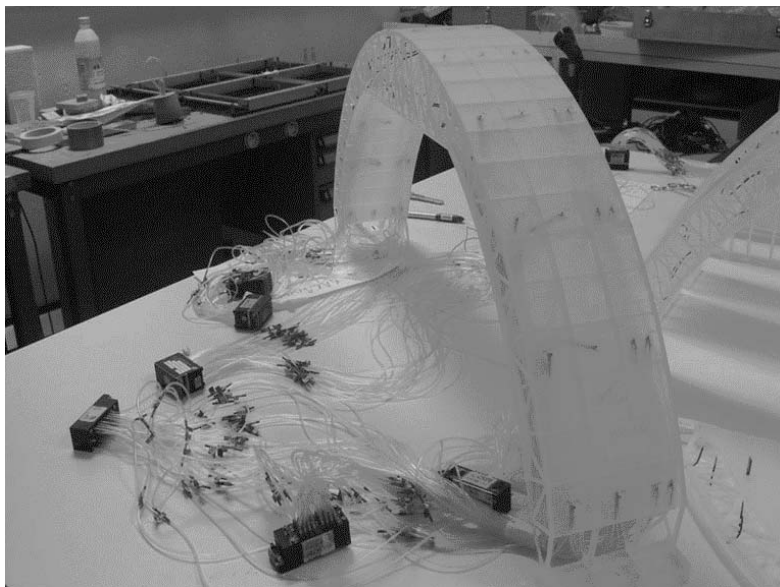


Рис. 32

В аеродинамічній трубі на обертовій платформі встановлювали моделі конфайнмента або його частин і Саркофага (рис. 33) та піддавали дії вітру у 24 напрямках. Оброблені результати обдування були основою для формування навантаг від вітру.

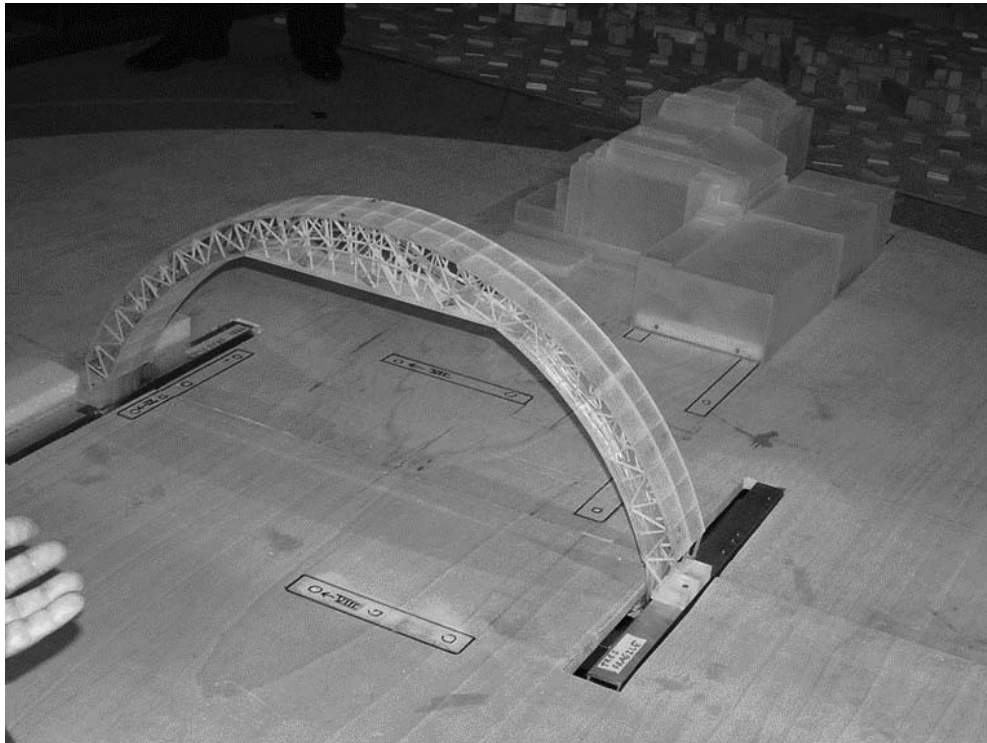


Рис. 33

Торнадо.

Вимоги міжнародних документів щодо безпеки ядерних об'єктів передбачають оцінку можливих аварій від дії торнадо. Визначення класу торнадо для майданчика ЧАЕС було виконано фахівцями Науково-дослідного інституту будівельних конструкцій [7], якими з метою збирання статистичних даних розглянуто географічний квадрат (трапецію) розміром 5×5 із майданчиком ЧАЕС у центрі. У підсумку розрахунковим виявився клас торнадо 3.0 за F-шкалою (або за шкалою Фудзіті – Пірсона), де клас F0 є найменшим (слабкі пошкодження), а клас F5 – найбільшим (колосальні руйнування). Зауважимо, що найбільш реальною небезпекою торнадо для споруд вважається руйнування даху. Під час руху воронки торнадо виникають катастрофічні вакуум-ефекти. При дії торнадо класу 3.0 перепад тиску складає 810 кгс/м^2 , а швидкості вітру досягають значень 100 м/с [16].

Моделювання впливу торнадо на конфайнмент враховувало різні положення воронки торнадо і різні напрями поступального руху. Всього для розрахунку конструкцій розглянуто 196 варіантів навантаги від дії торнадо, які відрізнялися положеннями центру воронки на покрівлі і напрямом руху торнадо. Для більшості елементів каркасу торнадо виявилось визначальним для підбору перерізу.

Перевірка міцності кріплення зовнішньої обшивки покрівлі на відривну дію торнадо була виконана експериментальним шляхом в лабораторіях науково-дослідного центру «СЕРАМ». А програма випробувань із визначенням числа експериментів за українськими нормами була розроблена за участю Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. Дослідні зразки в натуральну величину збиралися у суворій відповідності з проектом (рис. 34). Для створення навантаги вико-

ристовувалися мішки, що надувалися повітрям до потрібного тиску, виготовлені за допомогою «скотча» з рулонної поліхлорвінілової плівки. Ці мішки, розташовані під обшивкою, легко руйнували випробуваний зразок, імітуючи відривну дію (рис. 35).



Рис. 34



Рис. 35

Перший тест виявив недостатню міцність кріплень, тому було удосконалено форму клямерів і метод стикування листів. Завдяки цьому повторні випробування, виконані після коригування конструкції замкового з'єднання фальців, дали позитивний результат.

Задача 4. Форма прорізних вставок трубчастих елементів.

Визначний давньогрецький філософ і математик Піфагор вважав, що найдосконалішим тілом є куля, а найдосконалішою фігурою – коло. Що ж стосується металокопирктура, то він знає, що найкращим перерізом є кільце, а найкращим стержнем – труба. Внаслідок цього елементи НБК мають саме трубчасту форму (рис. 9). Вони добре працюють на стиск і розтяг, але погано стикуються у вузлах. З урахуванням зазначеного, автори проекту впровадили стандартне рішення, яке полягає в тому, що біля вузла стержень переходить від трубчастої форми до плоскої. Це робиться за допомогою листових прорізних вставок хрестової (рис. 36) або плоскої (рис. 37) форми.

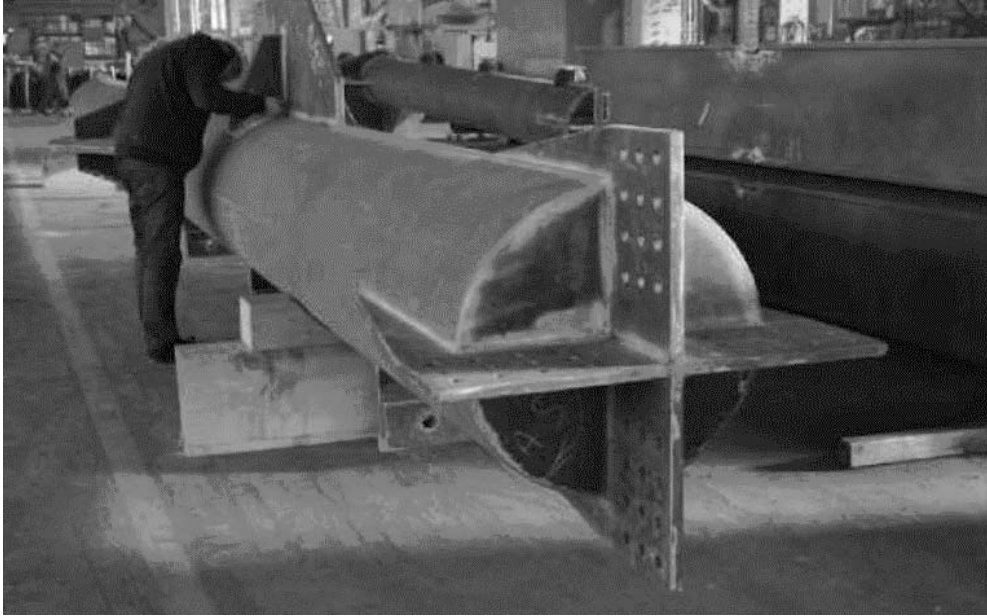


Рис. 36



Рис. 37

Варто підкреслити, що в обох випадках перетікання зусилля з труби на вставку супроводжується концентрацією напруг. Для їхнього оцінювання було виконано низку досліджень пружно-пластичного стану привузлової зони найбільш відповідальних трубчастих стержнів за допомогою програмного комплексу «NASTRAN» за методом скінченних елементів із урахуванням геометричної нелінійності.

Як приклад, показано результати розрахунків стержня з хрестовою вставкою, приєднаною до вузла вісьмома накладками, за допомогою 48-ми двохзрізних болтів із попереднім натягом.

Розрахункова модель досліджуваної зони складається з 15795 оболонкових скінченних елементів. Рис. 38 ілюструє її напружено-деформований стан у МПа під дією розтягувальної осьової сили, з якого очікувано випливає, що найбільш проблематичні ділянки труби знаходяться над вершинами вставки, де спостерігаються значні пластичні деформації металу. У розвинення сказаного пригадаємо, що раніше обережні проєктувальники в подібних місцях просвердлювали отвори і залишали їх незавареними, щоб зменшити концентрацію напруг. Втім більш детальний аналіз засвідчив, що отворів можна не робити, а вставка повинна мати форму, показану на рис. 39.

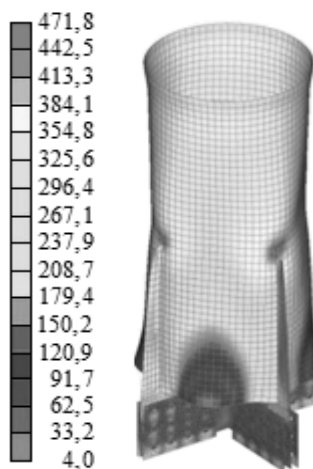


Рис. 38



Рис. 39

Задача 5. Розподіл фрикційних зусиль.

Розрахункова схема кінцевої зони трубчастого елемента містить у собі накладки й контактні зони, де виникають фрикційні зусилля. Розрахунок засвідчив спокійний напружений стан накладок і достатньо нерівномірний розподіл фрикційних зусиль між болтами, який виявився непередбачуваним.

На рис. 40 стрілочками у масштабі показано розмір і напрям фрикційних зусиль, зведених до болтів за результатами розрахунку. Болти розміщено у три ряди по чотири болти в кожному і натягнуті вони однаково. Але схема розподілу зусиль демонструє, що середній ряд болтів насправді майже «виключений» з роботи, а практично всі

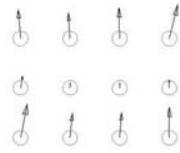
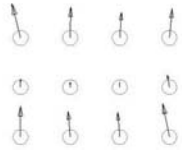
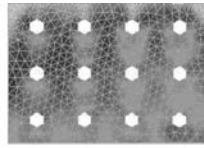
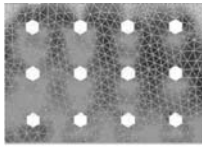


Рис. 40

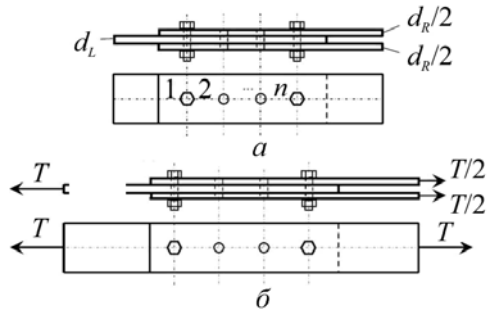


Рис. 41

зусилля передаються крайніми рядами. Вказане входить у деяке протиріччя з рекомендаціями державних будівельних норм, які у випадку однакових болтів дозволяють розподіляти фрикційні зусилля порівну між болтами.

Щоб розібратися у цій парадоксальній ситуації, розглянемо спрощену модель багаторядного болтового з'єднання металевих смуг (рис.41), призначеного для передавання поздовжнього зусилля T . У цьому з'єднанні смуги стягнуті двоохрізними болтами, а сила передається за допомогою сухого тертя між смугами. Вважатимемо, що в з'єднанні є n рядів болтів, номери яких наведені на рисунку. Для спрощення в кожному ряду показано по одному болту.

Якісну картину розподілу зусилля T між рядами болтів з'єднання можна зрозуміти з наступних міркувань. Насамперед розглянемо з'єднувальні деталі з просвердленими отворами для болтів. Зберемо це з'єднання не повністю, поставивши і затягнувши тільки болти крайніх рядів (з номерами 1 і n). Отвори для болтів проміжних рядів (з номерами 2, ..., $n-1$) залишимо вільними (рис. 41, а). Прикладемо зусилля T і будемо поступово розтягувати з'єднання. Стягнуті болтами смуги видовжуватимуться (рис. 41, б). До тих пір, поки під болтами крайніх рядів не буде проковзування, всі три стягнуті смуги на ділянці між крайніми рядами будуть розтягуватися рівномірно, і вільні від болтів отвори в усіх трьох смугах увесь час залишатимуться один проти одного. Якби там знаходилися болти, нічого не змінилося б: вони не сприймали б ніяких зусиль. З цього випливає висновок про те, що у багаторядному болтовому з'єднанні до тих пір, доки немає проковзування, усе зусилля, прикладене до з'єднання, передається тільки болтами крайніх рядів. Болти проміжних рядів в роботі участі не беруть.

Переходячи тепер від якісної картини роботи з'єднання до кількісної, встановимо як розподіляється зусилля T між крайніми рядами болтів, користуючись пружним розрахунком. Для визначеності вважатимемо, що болтами сполучені металеві смуги рівної ширини. Сума товщини смуг, що знаходяться зліва від з'єднання, дорівнює d_L , а сума товщини смуг, що знаходяться праворуч від з'єднання, дорівнює d_R . Зусилля T в проміжку між крайніми рядами болтів розподіляється між смугами, що сполучаються, пропорційно їхній товщині. Смуги з сумарною товщиною d_L передають усе зусилля на болти ряду n , а смуги з сумарною товщиною d_R – на болти ряду 1. Введемо в розгляд безрозмірні коефіцієнти розподілу $\eta_i (i = 1, 2, \dots, n)$, що показують, яка частка зусилля T сприймається i -м рядом болтів. Тоді зусилля $U_i (i = 1, 2, \dots, n)$, що передається силами тертя під i -м рядом болтів, можна виразити так:

$$U_i = T\eta_i \quad (i = 1, \dots, n),$$

а коефіцієнти розподілу – у наступний спосіб:

$$\eta_1 = \frac{d_R}{d_L + d_R}; \eta_i = 0 \quad (i = 2, \dots, n-1); \eta_n = \frac{d_L}{d_L + d_R}.$$

Розтягуватимемо з'єднання далі. Фрикційні зусилля під крайніми рядами болтів зростатимуть. Коли зусилля U_1 або U_n досягне тримальної здатності одного ряду болтів F , почнеться прослизання смуг металу під цим рядом болтів і в з'єднанні почнеться перерозподіл зусиль. Розтягуючи з'єднання все більшою силою, досягнемо його граничного стану, за якого смуги будуть проковзувати під усіма рядами болтів. При цьому зусилля T досягне свого максимального значення:

$$T_{\max} = nF. \quad (3)$$

Отже, твердження нормативних документів про розподіл зусилля порівну між усіма болтами виконується тільки в граничному стані після проковзування з'єднаних елементів.

З'єднання має працювати не тільки за фіксованої максимальної навантаги T_{\max} , але й за інших величин навантаг T , що знаходяться в деякому діапазоні:

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max}. \quad (4)$$

Сила T_{\max} відома і надається формулою (3). Задача полягає у визначенні мінімального значення T_{\min} . Працездатність з'єднання логічно тлумачити у сенсі пристосованості, тобто вважати, що після скінченного числа локальних проковзувань з'єднання стабілізується і буде працювати надалі пружно без проковзування, яким би чином не змінювалося зусилля, що діє на з'єднання, залишаючись у діапазоні, встановленому формулою (4). Інакше в з'єднанні відбуватимуться багаторазові проковзування. Поверхні, що контактують, відшліфуватимуться, коефіцієнт тертя цих поверхонь буде зменшуватися, що призведе до розладу з'єднання або до його руйнування.

Так чи інакше, поглиблений розрахунок кінцевої зони трубчастого елемента привернув увагу до проблеми пристосованості багаторядного фрикційного з'єднання, яка хоч і не має прямого відношення до НБК, але важлива для мостових або інших конструкцій, що працюють під дією змінних навантаг (чим не тема дисертації?). Вона має безпосередню схожість з проблемою пристосованості пружно-пластичних конструкцій і детальніше розглянута в роботах [6, 13, 14].

У підсумку вкажемо на те, що проектуючи багаторядні фрикційні з'єднання, потрібно мати на увазі, що вони сприймають змінні зусилля за правилами пристосованості. У багаторядному болтовому з'єднанні доти, доки немає проковзування, все зусилля, прикладене до з'єднання, передається лише болтами крайніх рядів. Натомість твердження нормативних документів про розподіл зусилля порівну між усіма болтами з'єднання виконується не завжди, а лише після проковзування з'єднаних елементів. Відтак у з'єднаннях, підданих симетричним знакозмінним діям, краще обмежитись двома рядами болтів.

Задача 6. Сейсмічні впливи.

Розрахунок об'єктів ядерної галузі обов'язково враховує сейсмічну активність із врахуванням деталізованих досліджень ділянки будівництва. З огляду на це, розрахунок конфайнмента на вплив сейсміки виконано з використанням двох підходів: поперше, лінійно-спектральним методом за даними майданчика ЧАЕС і, по-друге, за спеціально розробленими для майданчика будівництва трьохкомпонентними акселерограмами землетрусів.

Проте спроба прямого інтегрування акселерограм призвела до певної неадекватності, згідно з якою спостерігалось постійне незворотне переміщення всієї споруди (графік 3 на рис. 42). Задля коригування цієї неадекватності було розглянуто декілька схем, остаточною з яких обрано коригування верхніх частот 4-го порядку з частотою 0,05 Гц. З метою перевірки отриманого результату було використано обчислювальний комплекс

SCAD із коригуванням базової лінії. Результати обох методів балансування акселерограм виявились схожими і призвели до зникнення тренду зміщень (рис. 43). На рис. 42 і рис. 43 цифрами позначено графіки: 1 – акселерограма; 2 – перший інтеграл акселерограми (велосиграма); 3 – другий інтеграл акселерограми (сейсмограма).

Варто підкреслити, що під час розрахунку за акселерограмами НБК, як дуже великої в плані споруди, було враховано запізнення сейсмічної хвилі між впливом на південну і північну групу опор арки. Враховуючи усереднену швидкість сейсмічної хвилі 275 м/с, запізнення склало 0,93 с.

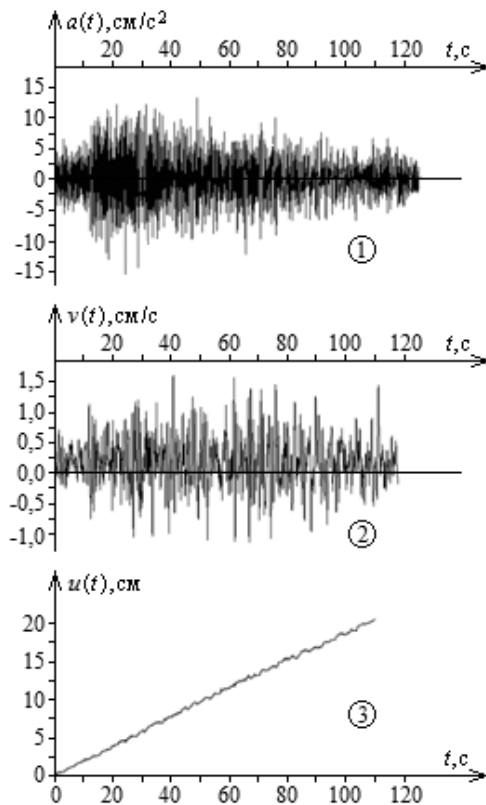


Рис. 42

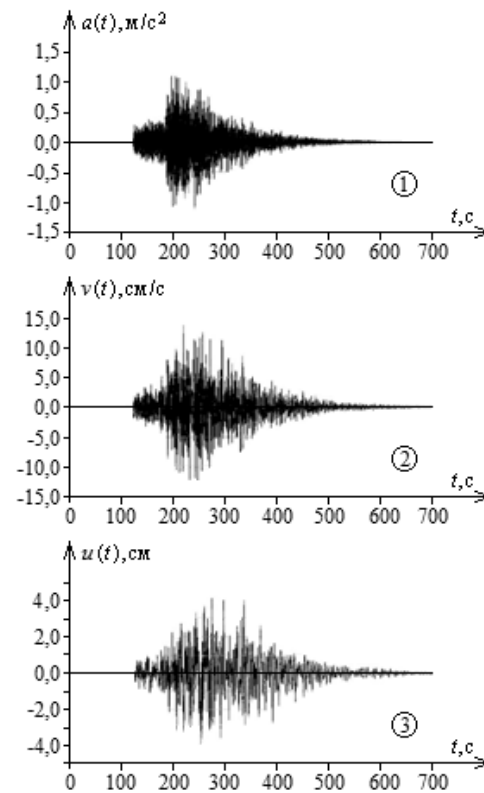


Рис. 43

Цікавим є також те, що результати співставлення розрахунків за спектральним методом і за акселерограмами показали більші внутрішні зусилля в деяких елементах саме за акселерограмами. Проте ці перевищення виявились незначними у порівнянні з тримальною здатністю елементів, оскільки визначальною навантагою для підбирання перерізів була дія торнадо класу 3.0.

Задача 7. Удари твердих тіл.

З самого початку проектування конфайнмента було зрозуміло, що його зовнішнє облицювання потрібно розрахувати на удари твердого тіла, які можуть відбутися у процесі сходження снігової лавини або під час торнадо (про цілеспрямований удар безпілотного літального апарата з наступним вибухом у той час ніхто навіть не міг собі уявити). Утім яка має бути маса, форма та швидкість твердого тіла до пуття не було відомо. Усі розуміли, що ці параметри невизначені і можуть змінюватися в широкому діапазоні. Падіння метеорита або літака виключали, про військове втручання ніхто не думав. Після тривалих обговорень вирішили погодитися з тим, що зовнішня оболонка має витримати удар овальної брили з масою 15 кг, яка рухається зі швидкістю 10 м/сек перпендикулярно до поверхні покрівлі й оформили це рішення протоколом. Дебати було завершено і подальші дослідження виконувались із високою точністю.

Дослідження були виконані експериментально в лабораторіях науково-дослідного центру «CERAM». З льоду було виготовлено декілька брил у формі циліндра з напівсферичним торцем з діаметром 28,4 см та масою 15 кг (рис. 44), які скидали з висоти 5,1 м. Вони падали і на гофр (рис. 45) і на проміжок між гофрами, пошкоджуючи нержавіючий лист, але ці пошкодження не були небезпечними. Врешті-решт, випробування пройшли нормально.



Рис. 44



Рис. 45

Задача 8. Ітерація підбору перерізів.

Під час дублювальних розрахунків ненароком мав місце цікавий експеримент. Виявилося, що багато елементів, підібраних консорціумом «Novarka Construction Company» за Єврокодом-3, не мали достатньої тримальної здатності, в основному для прийняття дії торнадо класу 3.0. З цієї причини для таких елементів були підібрані нові, підсилені перерізи [10].

Однак наші прискіпливі інженери побачили в цьому некоректність розрахунку. Адже жорсткість елементів у вихідних даних відрізнялася від жорсткості заново підібраних елементів. Прагнучі виключити цю некоректність, вирішили виконати ще один розрахунок, який базувався вже на жорсткості заново підібраних елементів у

надії, що цього разу жорсткість заново підібраних елементів співпаде з тією, що у вихідних даних. Проте, як не дивно, цього не трапилося, оскільки тримальна здатність нещодавно підібраних елементів знову виявилася недостатньою. Але, як добре відомо, надія помирає останньою. Відтак послідовно були виконані третій, четвертий, п'ятий і багато наступних розрахунків – і всі з незмінним результатом. Загалом витримки в інженерів вистачило на 17 ітерацій, після чого вирішили спинитися, тим більш, що перенапруження в елементах було вже незначним. У підсумку виявилось, що додаткові витрати металу на заміну хибно підібраних перерізів склали 344,47 т або 2,7% від загальних витрат.

Принагідно слід сказати, що проблема перерозрахунку статично-невизначуваних систем із причини коригування попередньо призначеної жорсткості виникає завжди. Існує неписане правило: якщо жорсткість підібраних елементів відрізняється від жорсткості вихідних елементів менш ніж на 30%, перерозрахунок можна не робити. Натомість експеримент із розрахунком НБК зайвий раз засвідчив, що це неписане правило занадто сміливе. Треба більш детально аналізувати результати розрахунків, перш ніж передати конструктору підібрані за ними перерізи.

4. Вентиляційна труба.

Дані про особливості конструкції вентиляційної труби та про задачі механіки, пов'язані з її проектуванням, виділені в окремий розділ, оскільки, на відміну від інших конструкцій, її проект був виконаний українською стороною.

4.1. Конструкція. На західній стіні НБК розміщено сталеву вентиляційну трубу з майданчиками та окремими сходами для її обслуговування і виходу на дах. Ця труба знаходиться на передньому плані практично всіх рекламних знімків НБК (рис. 46).



Рис. 46

Вентиляційна труба призначена для відведення очищеного повітря із основного об'єму арки, а також із технологічної залізобетонної будівлі, розміщеної під західною стіною НБК. Вентиляційна труба виконана з корозійностійкої хромонікелевої сталі марки 1.4307 за стандартом EN 10028-7 завтовшки від 6 мм до 10 мм, внутрішній діаметр 3,5 м. Вентиляційна труба опирається на дві двотаврові балки західної стіни НБК на рівні +103,42 і має два проміжні горизонтальні розкріплення, які обмежують радіальні переміщення труби. Конструкція розкріплення має вигляд прямокутної рами із консолями для обмеження тангенціальних переміщень. Така система більш вигідна, бо зменшує згинальні моменти в кільцях жорсткості і полегшує їх. На рис 47 наведено принципову схему розкріплення із позначенням літерами основних елементів: *N*, *S*, *W* – північна, південна і західна балки; *K* – консоль; *X* та *Y* – координатні осі.

Оголовок труби має форму зрізаного конуса для зменшення вихідного отвору до 2,5 м, рівень верху вентиляційної труби +115,0. Нижня частина вентиляційної труби примикає до технологічної будівлі на рівні +22,75 через гнучкий компенсатор, який забезпечує вільні горизонтальні і вертикальні переміщення відносно технологічної будівлі.

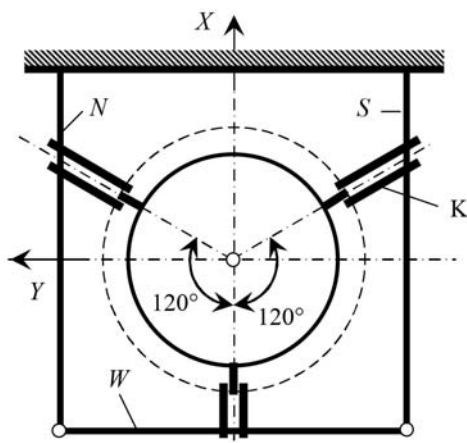


Рис. 47

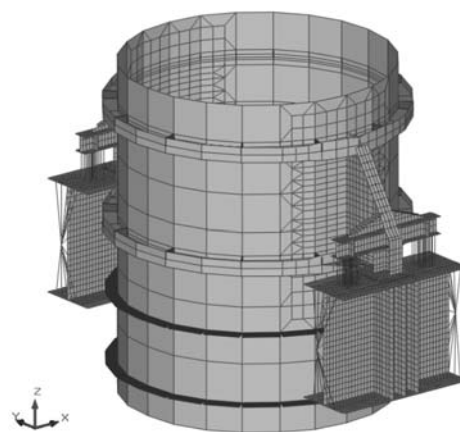


Рис. 48

У зоні опирання вентиляційної труби запроєктовано два масивних опорних ребра, які з'єднані з оболонкою труби через зовнішні кільцеві ребра жорсткості двотаврового перерізу. Під час розрахунку враховано ситуацію, коли (залежно від деформацій НБК) вентиляційна труба буде опиратися тільки на одне опорне ребро. Така ситуація може реалізуватися під час дії на НБК торнадо. Оскільки опорні двотаврові балки виконано із низьколегованої сталі, для уникнення контактної корозії передбачено прокладки, а також ребра жорсткості для домкратів на випадок заміни прокладок. На рис. 48 наведено скінченно-елементну модель фрагменту опорної зони вентиляційної труби і опорних двотаврових балок. З метою забезпечення жорсткості оболонки на циліндричній частині запроєктовано кільцеві зовнішні ребра жорсткості завтовшки 6 мм. Загальна маса конструкцій вентиляційної труби і майданчиків для доступу персоналу становить 83 тонни.

4.2. Обтікання вентиляційної труби вітровим потоком. Відомо, що задача обтікання потоками повітря циліндричних тіл добре вивчена і занесена до будівельних норм. Характер обтікання вітровим потоком циліндрів поблизу об'єктів із іншими геометричними формами залежить від багатьох факторів і є окремою задачею для дослідження. В проєкті НБК вентиляційна труба підвішена на його західній стіні. Просвіт між трубою і обшивкою західної стіни становить всього 0,71 м, тоді як діаметр труби – 3,5 м. Західна стіна конфайнмента виступає в ролі екрану, який направляє вітер вздовж стіни тим самим впливаючи на характер обтікання труби. Для розв'язання цієї задачі виконано чисельне моделювання, метою якого є вивчення при-

тискання труби до стіни, розподіл тиску по поверхні труби і виявлення наявності резонансних вихрових збуджень.

Замість дорогого експерименту було виконано математичне моделювання динамічного процесу впливу вітру за допомогою програмного комплексу ANSYS, під час якого довелося оперувати мільйонами невідомих величин і тисячами часових інтервалів. Комп'ютер добре впорався з розв'язанням цієї задачі, хоча йому знадобилося кілька діб безперервної роботи.

Розрахунок виконано для чотирьох швидкостей повітряного потоку: 10, 30, 50 і 80 м/с. Передусім для кожної з цих швидкостей були визначені статичні та динамічні впливи на трубу, які й лягли в основу розрахунків. У результаті з'ясувалось, що максимальні швидкості повітря та тиску виявилися зосередженими у вузькій щілині між трубою та стінкою конфайнмента. У всіх випадках було виявлено вихрове збудження. На рис. 49 зображено фрагмент візуалізації обтікання вентиляційної труби вітровим потоком безпосередньо біля західної стіни НБК (швидкості часточок повітряного потоку наведені у м/с).



Рис. 49

4.3. Сонячна радіація. Вплив приросту температури конструкції було повною мірою враховано під час проектування вентиляційної труби, розташованої на західній стіні НБК. На відміну від утепленої блискучої покрівлі НБК із полірованої корозійно-стійкої сталі, яка добре відбиває сонячну радіацію і перешкоджає зміні температурного режиму у кільцевому просторі, вентиляційна труба не має утеплення і спеціальної обробки поверхні. Поза тим, враховуючи строгую орієнтацію конфайнмента по сторонах світу, вентиляційна труба сильно і нерівномірно нагрівається сонячними променями під час заходу Сонця. Наслідком вказаного є додаткові зусилля в опорах, які виникають від дугоподібної деформації труби. Заради визначення максимальних реакцій в опорах і додаткових напруг у вентиляційній трубі була розв'язана задача про пошук найнесприятливішого положення Сонця з урахуванням розташування труби і закономірностей обертання Землі навколо своєї осі та навколо Сонця [17, 18].

Для цього потрібно врахувати часткове поглинання і розсіювання сонячних променів під час проходження атмосфери Землі (рис. 50), особливо помітне, коли Сонце знаходиться низько над горизонтом. Розглянемо загальний випадок потрапляння сонячних променів S на нормальну до них площину P на рівні поверхні Землі. Приймемо, що промені направлені під кутом λ до вертикалі V , радіус Землі позначимо як R , а товщину шару атмосфери – d . Потрібно за допомогою геометричних міркувань визначити значення x – тобто довжину шляху сонячного світла в атмосфері Землі. Проте для прикладного використання застосовують безрозмірний параметр m – відношення довжини шляху сонячного проміння до товщини атмосфери. Інтенсивність прямої сонячної радіації J , яка потрапляє на нормальний майданчик після проходження крізь атмосферу, можна знайти за емпіричною формулою:

$$J = 1370 \left(\frac{4,616 + 0,972m}{5,166 + m} \right)^m \text{ Вт/м}^2.$$

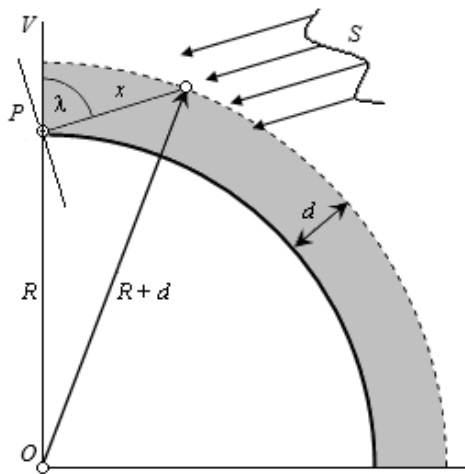


Рис. 50

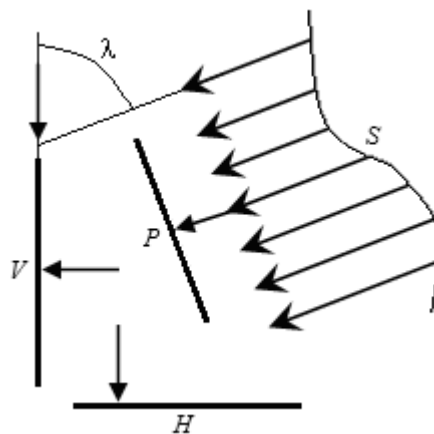


Рис. 51

Кількість сонячної радіації, що потрапляє на поверхню конструкції, залежить від її орієнтації щодо напрямку сонячних променів. Положення майданчика будемо характеризувати нормаллю до нього, яка орієнтована у такий спосіб, що сонячні промені утворюють з нею гострий кут (рис. 51). Інтенсивність сонячної радіації на похилому майданчику можна знайти множенням значення інтенсивності сонячної радіації на нормальному майданчику на косинус кута між напрямом сонячних променів і напрямом нормалі даного майданчика. Залежність кількості сонячної радіації для горизонтального та вертикального майданчиків у залежності від кута падіння λ наведено на рис. 52 і рис. 53, відповідно.

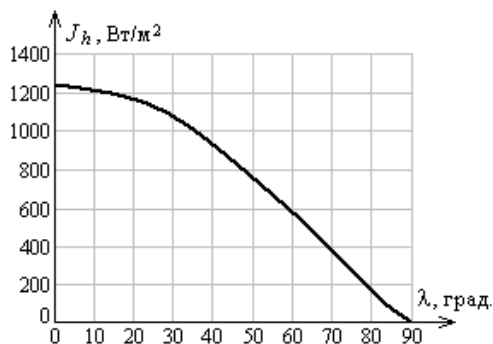


Рис. 52

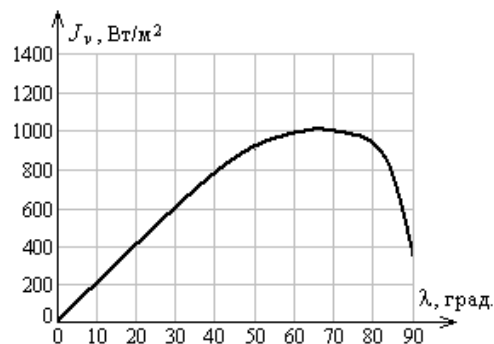


Рис. 53

Як вбачається з рис. 52, на горизонтальний майданчик може припасти щонайбільше 1242 Вт/м² прямої сонячної радіації, що реалізується виключно у сухому кліматі тропічних країн. Натомість на вертикальний майданчик (див. рис. 53) максимально спроможна потрапити 1018 Вт/м² прямої сонячної радіації, що може реалізуватися в будь-якій точці Землі тоді, коли Сонце буде під кутом 68° від вертикалі.

Принадно можна визначити кількість сонячної радіації, яка потрапляє на довільно орієнтований майданчик у будь-який день і час. Для цього потрібно знати косинуси кутів нахилу сонячних променів до вертикалі $\cos \lambda$ (рис. 54) і до нормалі площадки $\cos \theta$ (рис. 55).

Положення майданчика в просторі визначається двома кутами α та β . Кут α – це азимут, кут β – кут нахилу майданчика до горизонту. Кути λ і θ – це зенітний кут і кут нахилу сонячних променів до нормалі майданчика, відповідно. Зенітний кут

λ можна визначити для будь-якого дня року і часу доби враховуючи кут нахилу Сонця δ , часовий кут ω і широту місцевості φ за формулою:

$$\cos \lambda = \cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta .$$

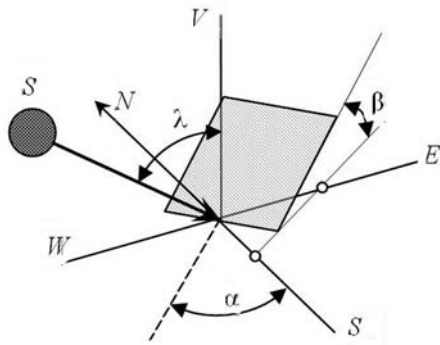


Рис. 54

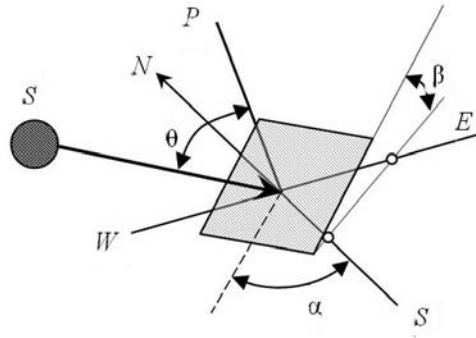


Рис. 55

Користуючись цією методикою можна виконувати розрахунки приросту температур від нагрівання сонячними променями елементів конструкції для будь-якого часу доби, дня року та положення елемента.

Підсумовуючи викладене зазначимо, що протягом проектування вентиляційної труби було розв'язано три нестандартні задачі, зокрема:

заміна радіального обпирання труби на тангенціальне;

заміна фізичного експерименту обтікання труби вітровим потоком поблизу плоского екрану математичним;

визначення розподілу температури по поверхні труби від сонячної радіації з використанням астрономічних даних про розташування сонячного диску на небесній сфері.

4.4. Монтаж. Проектування та будівництво вентиляційної труби постійно відкладалося через зміну концепцій її спорудження. Насамперед передбачався природний метод монтажу, за якого труба зводилася б у процесі підйому західної половини конфайнмента, підрошуючись трьома укрупненими ділянками. Проте така можливість була втрачена, через що було обрано метод укрупненого складання майже всієї труби в горизонтальному положенні з подальшим встановленням у проектний стан одним підйомом на завершальному етапі будівництва конфайнмента.



Рис. 56

Остаточний варіант проекту вентиляційної труби було виконано Українським інститутом сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського лише у 2016 році. Для виконання монтажу вентиляційну трубу було розділено на дві монтажні частини: основна, завдовжки 83 м, і верхня, завдовжки 9,5 м. Основну частину, маса якої з попередньо встановленими трьома майданчиками становить більше ніж 70 т, було змонтовано одним підйомом (рис. 56).

У підйомі були задіяні три гусеничні крани. Основну частину потрібно було встановити на два опорні елементи, розташовані на рівні +103,42 м у безпосередній близькості до вертикальної, вже облицьованої стіни. Спочатку було відпрацьовано комп'ютерну емуляцію процесу монтажу, а в натурі цю прецизійну роботу виконали кранівники високої кваліфікації з Азербайджанської Республіки. Враховуючи інерційні властивості масивного вантажу, переміщення здійснювалися дуже повільно – зі швидкістю, що становила сантиметри за хвилину. Підйом загалом тривав цілу зміну. На завершальному етапі верхню частину труби було піднято баштовим краном і з'єднано із основною частиною болтами.

5. Пошкодження конфайнмента.

5.1. Коротка історія. Уночі 14.02.2025, а саме о 01 годині 59 хвилин відбулося пряме влучання безпілотного літального апарату (попередньо «Шахед») у захисну оболонку НБК на рівні 87 метрів від поверхні землі над приміщенням технологічного обладнання. Від влучання з подальшим вибухом у зовнішній обшивці НБК утворилась пробоїна розміром близько 15 м² (рис. 57), також зруйнувалась частина внутрішньої обшивки. Тримальні сталеві конструкції зазнали деформацій від дії механічного удару й ударної хвилі та були локально посічені уламками (рис. 58). Однак вкрай небажаним результатом вибуху стала пожежа у шарі зовнішньої обшивки. Захищена з обох боків негорючим утеплювачем (рис. 4), EPDM-мембрана від вибуху була оголена, що, на жаль, створило умови для виникнення прямого полум'я. Займання поширилося на значну площу. Не маючи фізичного доступу до багатьох осередків загоряння, пожежники вимушені були робити отвори в зовнішній обшивці (рис. 59). Втім, незважаючи на всі зусилля і важку роботу пожежних, які за 4 години перебування на покрівлі отримували річну допустиму дозу радіації, пожежа поширилася на значну частину покрівлі й повністю припинилась тільки 7 березня, тобто через три тижні після займання. Внаслідок влучання локально пошкоджено зовнішню і внутрішню обшивки, деякі тримальні елементи, обладнання та мережі всередині конфайнмента.



Рис. 57



Рис. 58



Рис. 59

Проте найтяжчим наслідком стало вигорання мембрани на певних ділянках зовнішньої обшивки (рис. 60, позначені чорним кольором), яка була герметиком зовнішньої оболонки для підтримання мікроклімату і забезпечувала службу сталевих конструкцій упродовж 100 років.

5.2. Шляхи відновлення функцій. Можна говорити про два можливі сценарії відбудови серйозно пошкодженого НБК, перший з яких передбачає повне відновлення всіх функцій цієї споруди. Для цього передусім слід замінити всі пошкоджені тримальні елементи, відремонтувати внутрішню обшивку і відновити її герметичність. Відтак, для повноцінного відновлення функцій зовнішньої обшивки слід виконати повну заміну всіх її елементів (рис. 4), починаючи від профільованого настилу, який

азнав пошкоджень від високих температур, і закінчуючи пошкодженим пожежниками зовнішнім облицюванням із корозійностійкої сталі, повторне застосування якого неможливе через особливості фальцевих стиків. Такі масштабні роботи можливо здійснити тільки у монтажній зоні, подалі від зруйнованого реактора, для чого потрібно знову перемістити конфайнмент у місце його первісного спорудження. Перед цим потрібно провести комплекс складних робіт із відновлення шляхів пересування конфайнмента, а також від'єднання його від оточуючих будівель, конструкцій та мереж. За оцінкою фахівців Державного спеціалізованого підприємства ЧАЕС на повне відновлення функцій НБК потрібно декілька років.

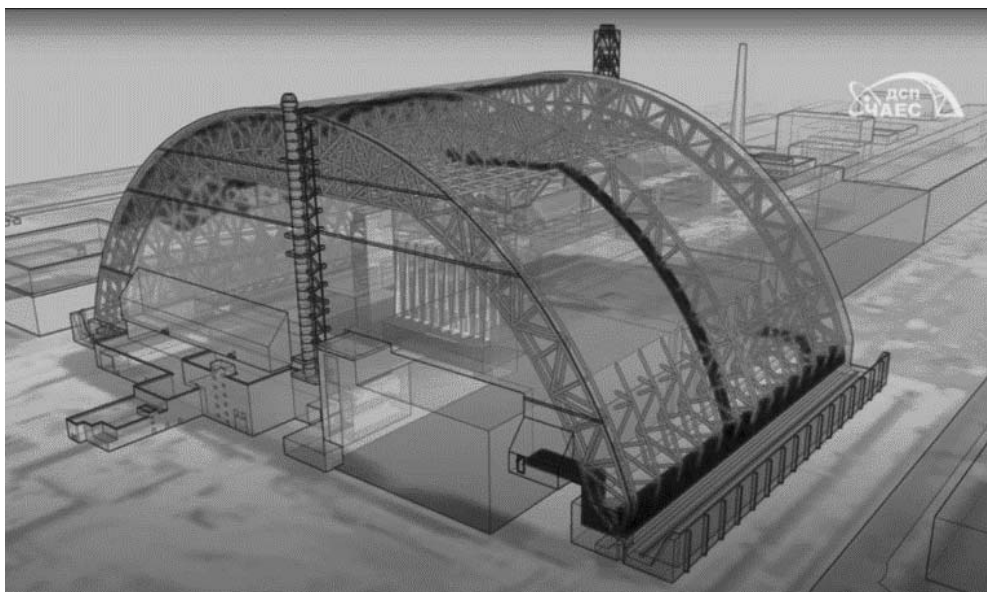


Рис. 60

Другий сценарій є паліативним. Йому притаманна відмова від функціонування кільцевого контуру споруди та від захисту конструкцій з чорного металу від корозії, яке за проектом забезпечувалося шляхом кондиціонування повітря в кільцевій зоні. У другому сценарію відбудови, втім як і у першому, слід замінити або відремонтувати всі пошкоджені тримальні елементи, відремонтувати внутрішню обшивку і відновити її герметичність. Що ж стосується зовнішньої обшивки, то її не треба демонтувати та замінювати. Досить відремонтувати пошкоджений зовнішній шар нержавіючої сталі з таким розрахунком, щоб він міг протистояти дощу, снігу і дії торнадо. Потрібно також переглянути систему вентиляції внутрішньої зони і захисту кільцевого контуру і зовнішнього середовища від пилу та аерозолів. Не виключено, що для реалізації другого сценарію можна буде провадити всі роботи в сервісній зоні. Зрозуміло, що довговічність і надійність функціонування НБК при цьому будуть зменшені, але другий сценарій відбудови може бути тимчасовим.

У будь-якому випадку, рішення щодо сценаріїв і методів відновлення функцій НБК беззаперечно потрібно приймати за участю спеціалістів з радіаційної безпеки.

Висновки.

Створення унікальної великогабаритної споруди, якою є Новий безпечний конфайнмент, викликало до життя низку оригінальних конструктивних рішень і породило серію нових механічних задач. Виявлення особливостей конструктивних рішень, опис й аналіз нових задач механіки та методів їх розв'язання склали основу цієї статті.

Зокрема, великий прогін споруди і крутий схил покриття породив задачу про сходження снігової лавини. Результати її розв'язку – ширина смуги розкидання снігу й динамічні зусилля в зоні зіткнення лавини з перешкодою були використані для проектування снігоприймального лотка.

Велика висота вільного простору всередині конфайнмента і складна система вентиляції вимусили приділити увагу аеростатичним навантагам та оцінити їхній вплив на напружений стан огорожувальних і тримальних конструкцій. Критичною для навантаг такого типу виявилася внутрішня оболонка.

Надзвичайно масштабні трубчасті тримальні елементи з великим різноманіттям перерізів були об'єктом детального вивчення. Було ухвалене рішення про індивідуальне їх виготовлення з листового прокату. Однак, уніфікована конструкція кінцевих вставок дозволила обмежитися прямокутною формою листової заготовки для виготовлення трубчастого елемента і мінімізувати кількість відходів.

Детальний розрахунок кінцевиків трубчастих елементів за методом скінченних елементів дав можливість оптимізувати форму кінцевої вставки і спростити конструкцію зварного з'єднання в зоні найбільшої концентрації напруг.

Результати розрахунку фрикційних з'єднань із великою кількістю болтів із попереднім натягом поставили під сумнів гіпотезу про рівномірний розподіл фрикційних зусиль між болтами з'єднання. Виявилось, що такий розподіл спостерігається лише в граничному стані у разі статичної навантаги. У випадку динамічної або змінної у часі навантаги болти, розміщені на периферії з'єднання, перебирають на себе підвищені зусилля, які викликають проковзування під болтами і з часом призводять до деградації з'єднання. Це породжує думку про те, що багатоболтові фрикційні з'єднання слід розглядати і розраховувати з позицій пристосовуваності, що створює новий вид задач у розрахунку фрикційних з'єднань. З ним пов'язана необхідність додаткових досліджень і розробка методик розрахунку.

Вентиляційна труба конфайнмента розташована на невеликій відстані від західної стіни. У зв'язку з цим виникла задача про обтікання потоком повітря циліндра, розташованого поблизу плоского екрану. Не маючи можливості поставити фізичний експеримент в аеродинамічній трубі, Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського вдався до математичного моделювання за допомогою програми ANSYS. Всі дані про обтікання труби для інженерного розрахунку були отримані на комп'ютері. Задача виявилася дуже громіздкою й забрала близько 200 годин машинного часу.

З розрахунком вентиляційної труби пов'язана задача про нагрівання металевих конструкцій прямими сонячними променями. Ця задача була розв'язана теоретичним методом. Отримано прямі розрахункові формули, які враховують орієнтацію досліджуваного майданчика відносно поверхні Землі і розташування диску Сонця на небесній сфері.

Завдяки наявності експериментального обладнання в лабораторіях Західної Європи, багато задач, пов'язаних з проектуванням Нового безпечного конфайнмента, було розв'язано шляхом експерименту. Зокрема це були задачі про ступінь герметичності зовнішньої і внутрішньої оболонок, про дію вітру на конфайнмент у зібраному і напівзібраному вигляді (дослідження на моделях в аеродинамічній трубі), про міцність закріплення зовнішнього нержавіючого листа при дії від'ємного тиску торнадо, про падіння льодяної брили на поверхню конфайнмента, про міцність з'єднувальних нагелів для кріплення огорожувальних конструкцій тощо.

Взаємодія вітчизняних інженерів із європейськими та американськими колегами вплинула також і на деякі зміни у вітчизняних будівельних нормах і стандартах, які під час проектування і будівництва конфайнмента активно впроваджувались в Україні на заміну радянських СНІП.

Ознайомлення з оригінальними конструктивними рішеннями для Нового безпечного конфайнмента і новими видами задач механіки, які виявилися під час його проектування, буде сприяти розширенню світогляду вітчизняних науковців і інженерів і підвищенню їхньої кваліфікації до світового рівня. Описане в статті вибухове пошко-

дження зовнішньої оболонки і наступна пожежа огорожувальних конструкцій повинні стати пересторогою для визначення небезпечних факторів, що впливають на надійність відповідальних об'єктів.

РЕЗЮМЕ. Проведено аналіз технічних рішень, реалізованих під час будівництва Нового безпечного конфайнмента, з метою їхнього вивчення, узагальнення і впровадження в разі проєктування нових унікальних об'єктів. Розглянуто нові механічні задачі, які були сформульовані і розв'язані для забезпечення надійності цієї унікальної інженерної споруди і надано рекомендації щодо їхнього подальшого використання. Обговорено недоліки технічних рішень огорожувальних конструкцій, які проявилися в результаті вибухового пошкодження Нового безпечного конфайнмента і наведено міркування про ремонт і можливість повного відновлення захисних функцій цього специфічного об'єкта.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: новий безпечний конфайнмент, снігова лавина, аеронавантаження, пристосовуваність, сонячна радіація, вибухове пошкодження, вогневе пошкодження, відновлення герметизації.

1. *Баженов В.А., Перельмутер А.В., Шишов О.В.* Будівельна механіка. Комп'ютерні технології і моделювання. – Київ: ВПОЛ, 2009. – 896 с.
2. *Гладштейн Л.И., Бабушкин В.М., Какулия Б.Ф., Гафуров Р.В.* Высокопрочные болты для строительных стальных конструкций с контролем натяжения по срезу концевой элемента // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 5. – С. 11 – 13.
3. *Гордеев В.Н., Перельмутер А.В.* Стальные конструкции защитных сооружений Чернобыльской атомной электростанции – Киев: Сталь, 2020. – 80 с.
4. *Державні будівельні норми України. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проєктування: ДБН В.1.2-2:2006.* – Київ: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. – 65 с.
5. *Козлова Е.А.* Схватка с неизвестностью. К 25-летию Чернобыльской катастрофы и 25-летию сооружения объекта «Укрытие» – Москва: ИздАт, 2011. – 624 с.
6. *Койтер В.Т.* Общие теоремы теории упруго-пластических сред – Москва: Издательство иностранной литературы, 1961. – 80 с.
7. *Корицунов Д.А.* Методики оценки смерчопасности // Строительная механика и расчет сооружений. – 2006. – № 1. – С. 61 – 64.
8. *Круковский П.Г., Метель М.А., Склярченко Д.И., Краснов В.А., Сулимов В.П., Бороздин В.Г., Поклонский В.Г.* Новый безопасный конфайнмент Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации) – Киев: Франко Пак, 2019. – 297 с.
9. *Немчинов Ю.И., Кривошеев П.И., Сидоренко М.В. и др.* От Укрытия до Конфайнмента четвертого блока Чернобыльской АЭС. Строительные аспекты – Киев: Логос, 2006. – 464 с.
10. *Перельмутер А.В.* Из опыта расчетов Нового безопасного конфайнмента Чернобыльской АЭС // Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. Том 2. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО. – Москва: АСВ, 2016. – С. 463 – 477.
11. *Перельмутер А.В., Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Махенько А.В., Пащинский В.А., Пичугин С.Ф.* Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. – Москва: СКАД СОФТ, Ассоциации строительных вузов, ДМК Пресс, 2014. – 592 с.
12. *Boutillon L., Wastiaux M., Coulet D.* The Chernobyl new safe confinement: an exemplary contribution by French companies. – IABSE Congress Stockholm, 2016. – 7 p.
13. *Churchman C.M., Korsunsky A.M., Hills D.A.* The application of plasticity principles to friction // J. Strain Analysis. – 2006. – 41. – P. 323 – 328.
14. *Drucker D.C.* Coulomb friction, plasticity, and limit loads // ASME J. Appl. Mech. – 1954. – 21. – P. 71 – 74.
15. *Hoorpah W., Perelmuter A.V.* The steel arch structure for Tchernobyl NSC: Comparative calculation with EC and Ukrainian standards // EUROSTEEL 2011: Proc. of 6-th European Conf. on Steel and Composite Structures; August 31 – September 2, 2011, Budapest, Hungary.

16. *Kondra M.P., Kopyiko O.V., Mikitarenko M.A., Perelmutter A.V., Prusov V.A.* Integral Estimate of Risk under Wind Action upon Structures of the Encasement at Chernobyl Atomic Power Plant // Proc. of the 2nd European and African Conf. on Wind Engineering; Genova, Italy, June 22 – 26, 1997. – SGE Ditoriali, Padova, 1997. – **2**. – P. 1833 – 1839.
17. *Kordun O.I., Makhinko A.V.* The influence of global warming on the change of climatic loads on the territory of Ukraine // In Lecture Notes in Civil Engng. – 2024. – **615**. – P. 83 – 93.
18. *Kordun O.I.* The influence of solar radiation on temperature increment of sheet steel structures // Archives of Civil Engng. – 2015. – **61**. – P. 89 – 102.
19. *Perelmutter A.V.* Assessment of the Tornado Impact on the Chernobyl New Safe Confinement // Magazine of Civil Engng. – 1996. – **220**. – N 5. – P. 18 – 26.
20. *Perelmutter A.V., Slivker V.I.* Handbook of Mechanical Stability in Engineering – New Jersey – London – Shanghai – Beijing – Singapore – Hong Kong – New Delhi: World Scientific Publishing Company, 2013. – 1656 p.
21. *Perelmutter A.V., Kondra M.P., Mikitarenko M.A., Denisenko G.P., Turchin P.P.* The assessment of damages and revival of serviceability of exhaust stack at Chernobyl Nuclear Power Plant // Proc. of the First Int. Conf. on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Seoul. – Taejon: Techno-Press, 1999. – P. 151 – 156.
22. *Schwob A., Coulet D., Wastiaux M.* Chernobyl: An arch for history // Travaux: Revue Technique de L'entreprise Générale de Travaux Publics. – 2013 – N 899. – P. 30 – 36.

Надійшла 30.09.2025

Затверджена до друку 27.01.2026