

Результати експериментальних досліджень деформацій ґрунтових основ великорозмірних фундаментів при позacentрових навантаженнях.

Сергій ГОЛОВКО¹, Євгеній БАУСК², Олексій ГОЛОВКО³, Олександр ХАРЧЕНКО⁴

^{1, 2, 3, 4} Український державний університет науки і технологій

24а, вул. Архітектора Олега Петрова, Дніпро, Україна, 49605

¹ golovko.pgasa@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-9374-4925>

² yabausk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0504-18911>

³ pgasa.golovko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3162-7554>

⁴ kharchenko.oleksandr@pdaba.edu.ua

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.55-63

Анотація. На прикладі багаторічних спостережень осідань та крену реакторних відділень АЕС досліджено закономірності розвитку деформацій основ в часі для оцінки експлуатаційної надійності та гарантованого подовження терміну безпечної експлуатації споруди.

В роботі зосереджено увагу на аналізі отриманих матеріалів натурних вимірів осадок та кренів і деформацій основ великорозмірних фундаментів реакторних відділень (РВ) в ґрунтових умовах Запорізької АЕС. Моніторинг деформацій основ споруд та комплексу будівель виконувався на протязі від 30 до 40 років, котрий включав виміри осадок та кренів споруди РВ, виміри крену реакторного апарату по фланцю головного роз'ємну, спостереження за динамікою крену при виконанні постійного моніторингу спеціальним обладнанням.

Метою натурних експериментальних досліджень було визначення та оцінка розвитку кренів РО в часі при високих статичних навантаженнях для визначення коректних моделей і проведення розрахунків з проектуванням стабілізації крену і забезпечення його допустимого значення для подальшої експлуатації реактору.

Проведена оцінка результатів досліджень кренів позacentрово навантажених фундаментів, запропоновано визначення крен по відомому або розрахунковому осіданню з використанням моделі коефіцієнта жорсткості основи при експериментально встановленому значенні відношення коефіцієнтів рівномірного та нерівномірного стиску. Зокрема прийнято метод стабілізації одностороннім навантаженням, величина та розташування котрого визначено розрахунками. Враховано стан та міцність



Сергій ГОЛОВКО

Завідувач комплексним науковим відділом проблем будівництва в складних інженерно-геологічних умовах, д.т.н., проф.



Євгеній БАУСК

Ст.н.с. лабораторії досліджень атомних та теплових електростанцій



Олексій ГОЛОВКО

Провідний науковий співробітник Комплексного наукового відділу проблем будівництва в складних інженерно-геологічних умовах, к.т.н., с.н.с..



Олександр ХАРЧЕНКО

Науковий співробітник Комплексного наукового відділу проблем будівництва в складних інженерно-геологічних умовах.

конструкцій споруди РВ щодо забезпечення виконання додаткового навантаження.

Проектування корегування кренів великорозмірних високо навантажених фундаментів споруд вимагає подальшого дослідження розрахункових схем і ситуацій, котрі суттєво впливають на загальний рівень надійності та безаварійної експлуатації споруди в цілому.

Ключові слова. Споруда реакторного відділення (РВ), ґрунтова основа, осадки, крени, коефіцієнти жорсткості основи рівномірного та нерівномірного стиску, стабілізація крену.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для багатьох споруд експлуатаційна надійність визначається приростами кренів у процесі тривалого ущільнення основ. До таких об'єктів можливо віднести копори баштового типу, лінії з точним технологічним обладнанням, різні види нерозрізних конструкцій, промислові будівлі з фундаментами на неоднорідних і шаруватих основах, будівлі та споруди складної форми і особливо реакторні відділення АЕС, для яких встановленні більш жорсткі вимоги до гранично допустимому крену ніж для основної номенклатури інших споруд (НП 306.2.141-2008, 2008; IAEA NS-G-3.6, 2004; ДБН В.2.1-10:2018, 2018). Реалізація проектів будівництва ставить ряд актуальних інженерних проблем, які можуть бути вирішені експериментальними дослідженнями роботи основ фундаментів при позакентрових навантаженнях. В інженерній практиці останніх років відзначається значна кількість об'єктів, які отримали наднормативні крени, розвиток яких продовжується тривалий час. Для розробки практичних методів розрахунку, а також методів стабілізації потрібні спеціальні дослідження реальної роботи ґрунтових основ великих розмірів при позакентрових навантаженнях. Особливо це актуально коли необхідно прийняти рішення щодо подовження експлуатації споруди реакторного відділення АЕС (IAEA NS-SSG-48, 2023).

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Особливістю фундаменту на ґрунтовій основі є те, що крім заданих активних сил, на нього впливають реактивні сили, величини яких в загальному випадку залежать від деформації основи. Правильність вибору основних факторів перевіряється відповідними об'єктивними експериментами і натуральними спостереженнями. Основи розраховують шляхом введення значної схематизації природних механічних процесів, замінюючи природну ґрунтову основу на деяку розрахункову механічну модель (ДБН В.2.1-10:2018, 2018).

Використання різноманітних моделей в частині розрахунку кренів в часі пов'язане з визначенням великої кількості параметрів ґрунтів та проведення складних математичних обчислень з відомими обмеженнями. Використання простих моделей потребує мінімальної кількості параметрів котрі визначати за відомими стандартними методами та зручні в використанні.

Рішення задачі про крен жорстких круглих та прямокутних плит на пружному напівпросторі за ексцентричного навантаження було отримано рядом авторів (Головко, 1986; Головко та ін. 2021; Watabe, 2013), однак на практиці фактичні та розрахункові як осадки так і крени можуть суттєво відрізнятися (Головко та ін. 2010). Необхідно відмітити метод коефіцієнтів жорсткості (Головко, 1986), котрий може відобразити ефект розподільчих властивостей основи за розрахунком, або по експериментально встановленим закономірностям, достатньо так підібрати закон розподілення під подошвою фундаменту коефіцієнта жорсткості, щоб забезпечити необхідний характер осадки та крену.

Модель коефіцієнтів жорсткості прийнята в нормах розрахунку фундаментів з динамічним навантаженням де основним параметром є коефіцієнт пружного рівномірного стиснення C_z при поступальному вертикальному переміщенні фундаменту та коефіцієнт пружного нерівномірного стиснення C_ϕ , при повороті фундаменту, котрі слід визначати експериментально, або розрахунком. Взаємозв'язок коефіцієнтів визначається співвідношенням: $C_\phi = 2 C_z$.

МЕТА РОБОТИ

Визначені на стадії проектування при використанні результатів стандартних геологічних вишукувань розрахункові осідання та крени великорозмірних фундаментів можуть суттєво відрізнятися від фактичних при довготривалих деформаціях ґрунтової основи. Вибір моделі залежить від численних факторів, в тому числі розмірів фундаменту, його форми і жорсткості, глибини закладення подошви, стану і фізико-

механічних характеристик ґрунтів основи, а також характеру їх нашарування прийнятої розрахункової глибини стисливої товщі (ДБН В.2.1-10:2018, 2018).

Натурні експериментальні виміри осадок та кренів, глибини стисливої товщі та зон впливу великорозмірних фундаментів в різних ґрунтових умовах дозволяють удосконалити існуючі розрахункові моделі. Особливого значення набувають також результати тривалих спостережень за деформуванням ґрунтової основи фундаментів РВ (СОУ НАЕК 109:2023, 2023; Bausk, 2007), які мають великі розміри, створюють значний тиск на основу, мають більші у декілька разів осідання, ніж розташовані від них на різних відстанях будівлі та споруди.

Очевидно, що на основі довготривалих спостережень може бути удосконалена розрахункова база проектування АЕС з моноблочною компоновкою.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Серійні уніфіковані реакторні відділення АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000 є масивними залізобетонними спорудами вагою 262000 т з розмірами в плані $68 \times 68\text{ м}$ і висотою 67 м показано на Рис. 1. Фундамент є коробчастою залізобетонною конструкцією розмірами в плані $68 \times 68\text{ м}$ і висотою 20 м з позначки $-7,2\text{ м}$ до позначки $13,2\text{ м}$. Внутрішні перекриття, стіни та діафрагми фундаменту монолітно пов'язані між собою нижньою і верхньою плитою. Верхня плита коробчастого фундаменту на позначці $13,2\text{ м}$ завтовшки $2,5\text{ м}$ є опорною частиною оболонки герметичної зони та облаштування реакторного відділення. Оболонка - монолітний залізобетонний циліндр діаметром 45 м , перекритий куполом з внутрішньою металевою ізоляцією.

Важливою особливістю споруди реакторного відділення є те, що реакторна установка (РУ) жорстко пов'язана з коробковим фундаментом високої жорсткості. Після остаточної установки ректору та фіксації в проектному положенні розвиток нерівномірних осідань основи і кренів викликає переміщення з нахилом установки.

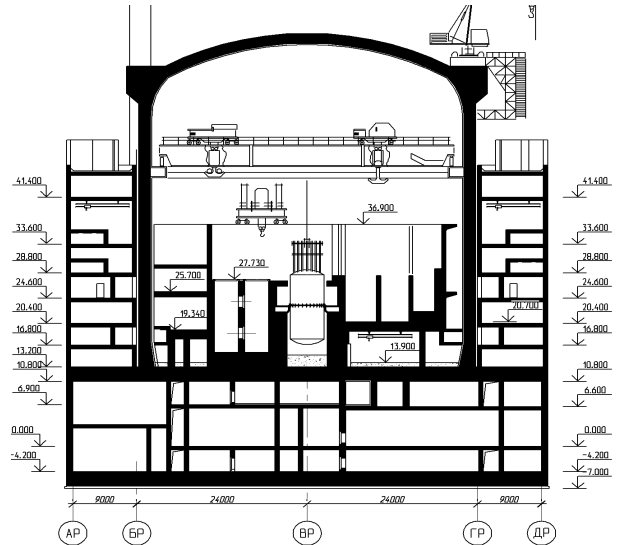


Рис.1. Розріз реакторного відділення.
Fig.1. Section of the reactor department.

Для забезпечення безпеки роботи реакторів найбільшого значення набувають обмеження за умовами роботи технологічного обладнання. Граничні значення спільної деформації основи та споруд за технологічними вимогами встановлюються відповідними нормами проектування будівель та споруд АЕС, правилами технічної експлуатації енергетичного обладнання або завданням на проектування з урахуванням, у необхідних випадках, рихтування положення обладнання у процесі експлуатації. Так крен реакторного відділення для реакторного апарату типу ВВЕР-1000 обмежений величиною ухилу фланця головного роз'єму реактора.

Особливо слід виділити, що допустимі осідання жорсткої споруди РВ мають значення в межах $200\text{--}300\text{ мм}$, і як правило при значних осадках є висока вірогідність розвитку кренів, які за технологічним обмеженням на порядок менші від допустимого крену для споруди.

В процесі будівництва жорсткість споруди, і в першу чергу, фундаментної конструкції, змінюється. При зведенні постаменту до позначки $13,6\text{ м}$ жорсткість фундаментної конструкції значно збільшується. Після бетонування верхньої плити фундаменту навантаження на основу досягає 40% і середній тиск під подошвою становить

$P=0,25$ МПа ($2,5$ кг/см²). До моменту жорсткого закріплення реактору нерівномірні навантаження не мають істотного впливу на обладнання та будівлю. Потім нерівномірні односторонні навантаження можуть викликати крен споруди в будівельний період з наступним розвитком тривалий час.

Після набору верхньої плитою проектною міцності йде інтенсивний монтаж будівельних конструкцій оболонки та облаштування укрупненими блоками. Навантаження на основу передається через жорстку коробку фундаментну конструкцію. На цьому етапі будівництва можливе виникнення значних навантажень з великими ексцентриситетами, що спостерігалось на першому та четвертому блоках Запорізької АЕС. На момент закінчення будівельних робіт та монтажу технологічного обладнання тиск на основу зростає до $P=0,56$ МПа. Після повного навантаження змінити отриманий у будівельний період крен реакторної установки можливо лише спеціальними дороговартісними конструктивними заходами

В процесі проведення моніторингу деформацій фіксувалися навантаження на фундаменти на різних етапах будівництва споруд. Додатково виконані спостереження за пошаровими деформаціями ґрунтової основи, а також деформацій поверхні та фундаментів за межами площі, завантаженої фундаментною плитою реакторного відділення.

Після закінчення будівництва та монтажу обладнання ексцентриситет прикладення рівнодіючого навантаження на рівні підшви фундаментів реакторних відділень уніфікованих АЕС складає $0,56...0,62$ м. Для зниження кренів реакторних відділень №5 та №6 на стадії будівництва були внесені корективи в розміри фундаменту (Головка та ін., 2010), які привели до зниження ексцентриситету навантажень до $0,06$ м і технологічні вимоги були виконані з моменту пуску до 2021 року. Середній тиск під підшвою фундаментів цих блоків склав $0,552$ МПа.

За результатами геологічних досліджень основу фундаментів реакторних відділень Запорізької АЕС складено пісками середньої щільності та щільними, дрібними та середньозернистими на глибину $20...26$ м

(ІГЕ-1) з незначними прошарками пластичних супісків. Піски підстиляються палеогеновими глинами середньою потужністю $13...20$ м (ІГЕ-2). За результатами досліджень на стадії проектування модуль деформації пісків оцінений значеннями $30...40$ МПа, глини - 20 МПа. Шар глини підстиляється різнозернистими глауконітовими щільними пісками (ІГЕ-3), з модулем деформації 45 МПа, твердими піщанистими глауконітовими глинами (ІГЕ-4) з модулем деформації $30...40$ МПа, слабозцементованими пісковиками і каоліном. Осадкові відкладення перекривають граніти кристалічного щита. Усі перелічені шари у плямі споруди залягають практично горизонтально. Ґрунтові води розташовані на рівні підшви фундаментів на глибинах $6-7$ м від поверхні.

Проектування РВ АЕС виконувалось за діючими на кінець 70-х років нормами. Осадки визначалися за двома моделями: шару скінченної товщини при глибині стисливої зони до $15,5$ м [6] в межах верхніх піщаних відкладень та за моделлю пружного напівпростору з умовним обмеженням глибини стисливої зони.

При визначенні вишукуваннями деформаційних характеристиках розрахункові осадки за першою моделлю склали $210-220$ мм при розрахункових кренах $0,310$ та $0,450$ мм/м відповідно для РО-1 та РО-3. За другою розрахунковою схемою відповідно 765 та 794 мм при крені $0,27$ та $0,29$ мм/м. в залежності від характеристик ґрунту за вишукуванням різних років. Розрахункові значення не суттєво відрізнялись при прийнятих характеристиках за результатами вишукувань на стадії проектування та контрольних при експлуатації.

За результатами довготривалих спостережень станом на 2013 рік (Bausk, 2007) осадки склали для РО 1 $208-222$ мм, для РО 3 $197-204$ мм та крен споруд $0,901$ і $0,870$ мм/м відповідно. Графіки розвитку осадок та кренів споруд показано на Рис. 2 свідчать про тривалі деформації основи з повільним збільшенням осадок та кренів.

Значна розбіжність і особливо в крені котрий перевищив розрахункові значення в 3 рази та досяг гранично допустимих значень

за технологічними обмеженнями викликала необхідність аналізу результатів раніше виконаних досліджень, котрі на жаль були лише частково враховані на стадії будівництва.

Відповідно до виконаних досліджень оцінити взаємозв'язок між осадками і кренами фундаментів можливо з використанням моделі коефіцієнтів жорсткості основи при рівномірному K_z і нерівномірному K_ϕ стиску.

Для пружного напівпростору в стабілізованому стані коефіцієнт рівномірного та нерівномірного стиску мають сенс у виді:

$$K_z = P/S \quad (1)$$

$$K_\phi = N \cdot e/(i \cdot I) \quad (2)$$

де P – тиск по підшві; S – осадка фундаменту; N – рівнодіюча вертикальних навантажень; e – ексцентриситет навантаження; i – крен фундаменту; I – момент інерції підшви;

Співвідношення коефіцієнтів має значення $K_\phi/K_z=2,67$. Цілком очевидно, що при відношенні коефіцієнтів, що є близьким до отриманого, крени фундаментів будуть відповідати розрахунковим значенням.

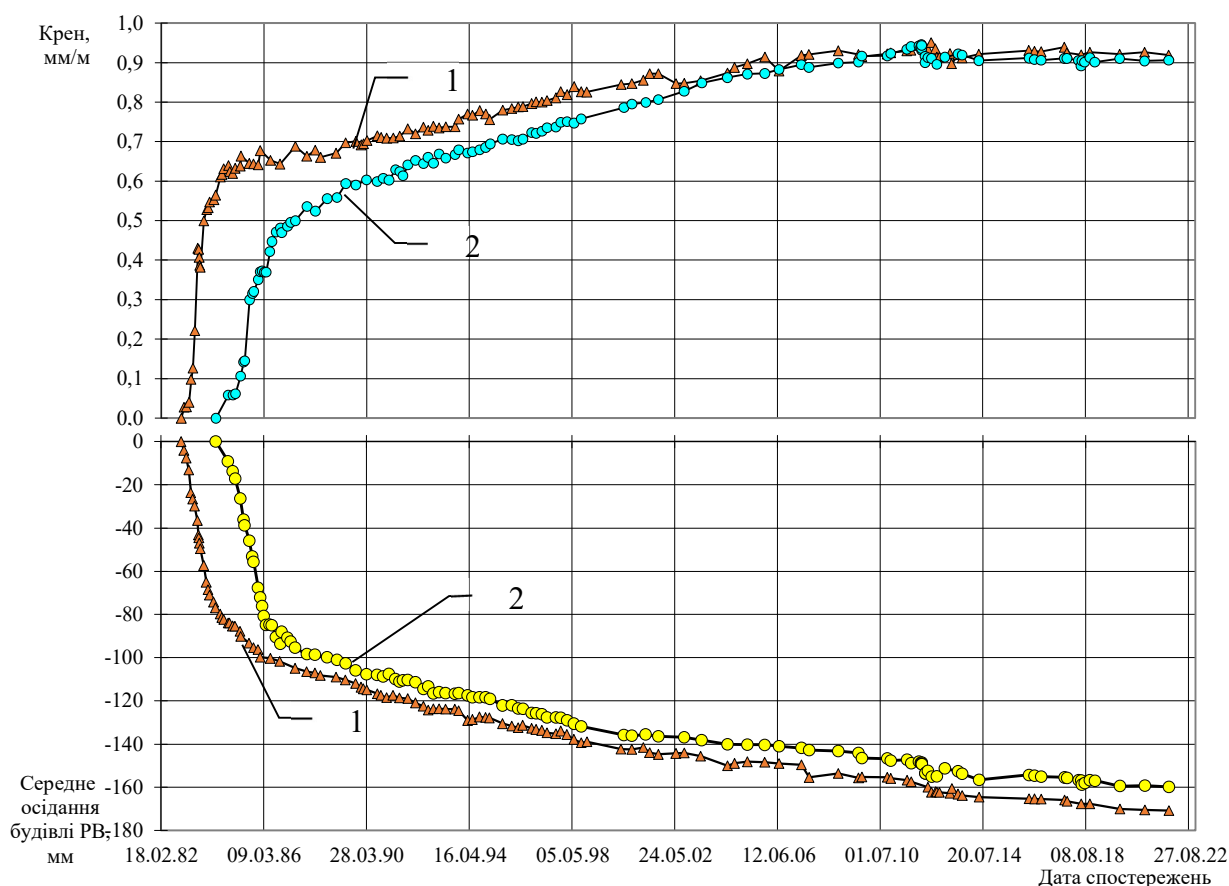


Рис.2. Закономірності розвитку осадок та кренів будівель реакторних відділень Запорізької АЕС: 1 – блоку №1; 2 – блоку №3

Fig.2. Patterns of development of settlements and tilts of the reactor compartment buildings of Zaporizhzhia NPP: 1 - unit No. 1; 2 - unit No. 3

В цілому, для ґрунтових основ прогноз кренів фундаментів може бути виконаний з використанням коефіцієнта жорсткості K_ϕ , визначеного за відомим середнім осіданням

з розрахунку, дослідження ґрунтів штампамі або по результатах довготривалих спостереженням за осіданнями споруд та експериментально встановленого співвідношення

між коефіцієнтом жорсткості при рівномірному та нерівномірному стиску.

На підставі досліджень розвитку середніх осадок та кренів при позацентровому навантаженні були отримані експериментальні залежності, аналіз яких дозволив зробити висновок, що відношення коефіцієнтів жорсткості $K\phi/Kz$ у процес стабілізації осадок штампів різної площі наближається до деякої постійної величини, значно відрізняючись від отриманого для моделі пружного напівпростору і в діапазоні середніх тисків $0,05...0,30$ МПа знаходиться в межах $K\phi/Kz=1,2...0,7$.

У зв'язку з цим представляють інтерес результати випробування ґрунтів статичним навантаженням на позначці закладення підпошки фундаменту будівлі РВ. Випробування були виконані з метою розрахункового обґрунтування осадок та кренів на майданчику будівництва енергоблоку № 5.

В умовах АЕС виконані штампові дослідження піщаного ґрунту основи позацентровими навантаженнями моделей жорстких круглих штампів. Випробування основи було проведено в серії випробувань штампами площею $0,5$ та $1,0$ м² при відносному ексцентриситеті навантаження $0,1-0,2r$ (r – радіус штампів) в діапазоні тиску під підпошкою до $0,95$ МПа.

Випробовувалися піски середньої щільності і щільні при ступінчастому навантаженні до умовної стабілізації осадок на кожному ступені, котрий становив $0,05$ МПа. Навантаження здійснювалося до тиску $0,575$ та $0,95$ МПа.

Результати випробувань показали, що залежність «осадка-навантаження» є лінійною практично до тиску $0,95$ МПа при випробуванні в відкритому котловані (рис. 3). На лінійній ділянці діаграми «осадка-тиск» модуль деформації ґрунту становить більше 100 МПа, суттєво відрізняючись від рекомендованих значень за результатами стандартних геологічних вишукувань.

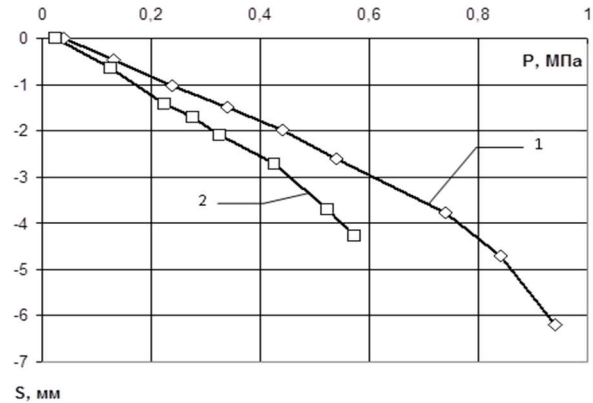


Рис.3. Залежність $S=f(P)$ 1 – для штампів площею $0,5$ м²; 2 – те ж $1,0$ м².

Fig.3. Dependency $S=f(P)$ 1 – for a flatter stamp $0,5$ м², 2 – the same $1,0$ м².

Цілком очевидна відмінність отриманих результатів в фактичних та розрахункових осадках та кренах, котрі були визначені за нормативними документами.

Результати спостережень за осадками та кренами реакторних відділень №1 та 3 приведені на Рис. 2 свідчать про незатухаючі деформації ґрунтової основи та тривалий їх розвиток що характерно для значної товщі основи спів мірної з розміром фундаментів.

Оцінку впливу осадок основи та крену на положення реакторного апарату виконано за результатами кореляційного аналізу параметрів осадкової площини споруди РВ та площини фланця реактора енергоблоків №1 та 3. За аналізом результатів чітко встановлено закономірність практичного спів падіння крену споруди та реактору, що дозволяє виконати як прогноз розвитку осадок та кренів на період подальшої експлуатації, так і визначитись з необхідністю стабілізації крену у відповідний проміжок часу. Контроль за кренами можливо виконати за декількома системами, основною з яких є облаштування осадкових марок по периметру споруди та вимір крену автоматизованою системою.

Необхідно зазначити, що при багаторічній експлуатації та в період продовження експлуатації енергетичного обладнання РВ 1,3 оцінка впливу на безпеку виконується в діапазоні малих значень деформацій основи котрі становлять до 10% від гранично допустимих осадок для споруди як будівельної конструкції. У цьому випадку виникає необхідність у адекватних розрахункових

моделях ґрунтової основи, які максимально достовірно відображають розрахункові значення крену при осадках близьких до умовно-стабілізованих і швидкостях котрі знаходяться в межах до 2,0 мм/рік.

Екстраполяція одержаних спостереженнями кривих «осадка - час» в область далеких часів дає найбільш правильні результати та дозволяє визначити терміни, коли необхідно розпочинати стабілізаційні заходи (Головко, 1986).

При розробці проекту стабілізації та регулювання крену реакторних відділень енергоблоків №1, 3 АЕС проектом рішенням було передбачено формування залізобетонного навантаження на покрівлі реактора з сторони протилежної крену, що забезпечувало перерозподіл тиску на основу по підшві фундаменту РВ. Метою проекту було досягнення стабілізації та зниження ухилу головного роз'єму енергетичного реактора для забезпечення продовження подальшої експлуатації. Враховуючи малі величини швидкості крену РВ розрахунок навантаження виконано з використанням коефіцієнта жорсткості основи визначеного за результатами спостережень за осадками споруди. Коефіцієнт жорсткості при рівномірному стиску визначено за фактичною осадкою реакторних відділень та тиском на основу, котрий склав $K_z = 56/0,2 = 280 \text{ т/м}^3$.

Величину додаткового ексцентричного навантаження визначено при прийнятому співвідношенні $K_\phi/K_z = 1,0$.

Розрахункова модель споруди РВ була розроблена в розрахунковому комплексі ПК ЛПА до якої були включені всі основні несучі будівельні конструкції. Основним предметом досліджень було виявлення ефективності роботи несучих будівельних конструкцій при різних комбінаціях навантажень, включаючи додаткове з великим ексцентриситетом відносно центральних осей споруди.

Конструкції додаткових навантажень на покрівлях РО-1 та РО-3 відрізнялися між собою у зв'язку з відмінностями у напрямках вектора загального крену, а також особливостями будови ґрунтових основ та наявністю на покрівлі РО-1 додаткового навантаження

(загальною вагою 1800 т), змонтованого під час будівництва.

На підставі розрахунків проектним рішенням по РВ-1 було передбачено монтаж залізобетонного навантаження на покрівлі облаштування будівлі реакторного відділення, котре складається із збірних залізобетонних балок прямокутного перетину масою 7,5 т. Загальна вага навантаження склала 2288 т.

Проектним рішенням щодо РО-3 передбачено монтаж залізобетонного навантаження на покрівлі облаштування будівлі практично по діагоналі в зв'язку з креном по двох головних осях з монолітної та збірної частин загальною вагою 4060 т показано на Рис 4. Конструкція монолітного залізобетонного навантаження являє собою залізобетонний масив розмірами $37,4 \times 12,8 \times 4,0$ м, складної форми в плані, загальною масою 2620 т.



Рис.4. Монтаж елементів навантаження.

Fig.4. Installation of load elements

За результатами геодезичного моніторингу осадок та кренів будівель реакторних відділень енергоблоків № 1,3 станом на 2021 рік виявлено загальну закономірність стабілізації, крени знизилися і становлять відповідно 92,8 % та 90,6 % гранично допустимого значення згідно норм.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Для визначення осадок та кренів будівель реакторних відділень АЕС у часі можуть

бути використані результати тривалих спостережень які повинні проводитись на протязі часу експлуатації споруди. Надійний прогноз деформацій основи можливо виконати по результатах довготривалих спостережень та визначити період часу щодо необхідності стабілізації крену.

Між креном будівлі та ухилом реакторної установки існує чітко виявлений взаємозв'язок, у будь-який момент часу за результатами спостережень за будівлею можна отримати положення фланця без спеціальних вимірювань у герметичній зоні.

При проектуванні додаткового стабілізаційного навантаження визначення кренів можливо виконати з використанням моделі коефіцієнта жорсткості при співвідношенні $K\varphi/Kz = 0,8 \dots 1,2$. Для масивних споруд ефективним може бути одностороннє навантаження регульовано типу, котре може включати монолітну та збірну частину з постійним контролем крену. Розроблені проекти були реалізовані на практиці, а результати натурного моніторингу підтвердили прийняті розрахункові моделі та ефективність проектних рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Загальні положення безпеки атомних станцій: НП 306.2.141-2008. (2008). К.: Державний комітет ядерного регулювання України.
2. Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants. Safety Guide: IAEA NS-G-3.6. (2004). Vienna: IAEA.
3. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення: ДБН В.2.1-10:2018. (2018) [Чинний від 2019.01.01]. К.: Міністерство України.
4. Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide: IAEA NS-SSG-48. (2023). Vienna: IAEA.
5. Експлуатація технологічного комплексу. Моніторинг будівельних конструкцій АЕС. Загальні вимоги: СОУ НАЕК 109:2023. (2023). К.: Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом».
6. Головка С.І. (1986). *Особенности взаимодействия внецентренно нагруженных фундаментов с основанием, обладающим*

реологическими свойствами. (Автореф. дис. ...канд. техн. наук). НДІБК. Київ.

7. Головка, С.І. (2021). Результати багаторічних експериментально-теоретичних досліджень деформацій ґрунтових основ великорозмірних високонавантажених фундаментів (Є. Бауск, О. Головка, Ред.). В *Інноваційні технології у будівництві, цивільній інженерії та архітектурі* (с.138-139). Дніпро: ДВНЗ ПДАБА. https://ipind.gov.ua/wp-content/uploads/2021/01/APA_style_Rekomendatsii-iz-zastosuvannia.pdf
8. Bausk, Eu. (2007) Safety Assessment of VVER-1000 PWR Type Containment Foundations *Transactions, SMiRT, 19, H06/6, 1-6.*
9. Головка, С.І., Седин, В.Л., Бауск, Е.А (2010) Оценка технического состояния и продление эксплуатации фундаментов защитной оболочки реакторного отделения ВВЭР-1000 *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, (9), 39-44.
10. Watabe, Y., & Sassa, S. (ed.). (2013). *Comparative study of long-term consolidation for subsoils under Kansai Airport and Pisa Tower: Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sept. 2013.* Paris: ISSMGE.

REFERENCES

1. Zahal'ni polozhennya bezpeky atomnykh stantsiy: NP 306.2.141-2008. (2008). K.: Derzhavnyy komitet yadernoho rehulyuvannya Ukrainy. (in Ukrainian).
2. Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants. Safety Guide: IAEA NS-G-3.6. (2004). Vienna: IAEA.
3. Osnovy i fundamenti budivel' ta sporud. Osnovni polozhennya: DBN V.2.1-10:2018 - [Chynnyy vid 2019.01.01]. - K.: Minrehion Ukrainy, 36 (in Ukrainian).
4. Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide: IAEA NS-SSG-48. (2023). Vienna: IAEA.
5. Ekspluatatsiya tekhnolohichnoho kompleksu. Monitorynh budivel'nykh konstruktсий AES. Zahal'ni vymohy: SOU NAEK 109:2023. (2023). - K.: Derzhavne pidpryyems-tvo «Natsional'na atomna enerhoheneruyu-cha kompaniya «Enerhoatom». (in Ukrainian).
6. Golovko S.I. (1986). *Osobennosti vzaimodeystviya vnetsentrenno nagruzhennykh fundamentov s osnovaniyem, obladayushchim*

reologicheskimi svoystvami [Peculiarities of the interaction of eccentrically loaded foundations with a foundation possessing rheological properties]. (Avtoref. dis. ...kand. tekhn. nauk). NDIBK. Kiïv. (in Russian).

7. Holovko, S.I. (2021). Rezul'taty bahatori-chnykh eksperymental'no-teoretychnykh doslidzhen' deformatsiy gruntovykh osnov velykorozmirnykh vysokonavantazhenykh fundamentiv [Results of many years of experimental and theoretical research into deformations of soil bases of large-sized highly loaded foundations] (YE. Bausk, O. Holovko, Red.). *V Innovatsiyni tekhnolohiyi u budivnytstvi, tsyvi-l'niy inzheneriyi ta arkhitekturi* (s.138-139). Dnipro: DVNZ PDABA. (in Ukrainian).
8. Bausk, Eu. (2007) Safety Assessment of VVER-1000 PWR Type Containment Foundations *Transactions, SMiRT, 19, H06/6, 1-6*.
9. Holovko, S.Y., Sedyu, V.L., Bausk, E.A (2010) Otsenka tekhnicheskoho sostoyannya y prodlenye ékspluatatsiy fundamentov zashchytnoy obolochky reaktornoho otdeleya VVER-1000 [Assessment of the technical condition and extension of the operation of the foundations of the protective shell of the VVER-1000 reactor compartment] *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhi-tektury*, (9), 39-44. (in Russian).
10. Watabe, Y., & Sassa, S. (ed.). (2013). *Comparative study of long-term consolidation for subsoils under Kansai Airport and Pisa Tower: Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sept. 2013*. Paris: ISSMGE.

Results of experimental studies of deformations of soil bases of large-sized foundations under eccentric loads.

Serhiy GOLOVKO,
Yevhenii BAUSK,
Oleksiy GOLOVKO,
Oleksandr KHARCHENKO

Summary. Using the example of long-term observations of settlements and tilting of reactor compartments of NPPs, the regularities of deformation development over time were studied to assess operational reliability and guaranteed extension of the safe operation period of the structure.

The work focuses on the analysis of the obtained materials of field observations of settlements and tilting and deformations of the bases of large-sized foundations of reactor compartments (RC) in the soil conditions of Zaporizhzhia NPP. Monitoring of deformations of the bases of structures and the building complex was carried out for 30 to 40 years, which included measurements of settlements and tilting of the RC structure, measurements of the reactor vessel tilt along the flange of the main separator, and observation of the dynamics of the tilt during continuous monitoring.

The purpose of the full-scale experimental studies was to determine and assess the development of the roll of the reactor over time under high static loads to determine the correct models and perform calculations with the design of roll stabilization and ensuring the permissible roll for further operation of the reactor. The results of the studies of rolls of eccentrically loaded foundations were evaluated, the determination of rolls by known or calculated settlement was proposed using the model of the stiffness coefficient of the base at an experimentally established value of the ratio of the coefficients of uniform and uneven compression. In particular, the method of stabilization by one-sided additional load was adopted, the magnitude and location of which were determined by calculations. The condition and strength of the structures of the reactor structure were taken into account to ensure additional loading.

It was established that the design of roll correction of large-sized highly loaded foundations of structures requires further study of calculation schemes and situations that significantly affect the overall level of reliability and trouble-free operation of the structure as a whole.

Keywords. Reactor compartment building (RB), soil base, settlements, rolls, base stiffness coefficients, roll stabilization.