

році на кафедрі мостів і будівельної механіки вже відбувся перший захист п'яти дипломних проектів інженерів спеціальності “Мости і транспортні тунелі”, а випуски інженерів мостовиків під час створення цієї спеціальності почались ще в 2001 році на кафедрі будівельних конструкцій та мостів. В наступному 2005–2006 навчальному році заплановано розпочати підготовку за спеціальністю “Мости і транспортні тунелі” магістрів. В цьому році на кафедрі працюють 3 професори, 7 кандидатів доцентів, 1 старший викладач, 5 наукових працівників лабораторій, 3 інженери і 2 лаборанти. При кафедрі працює науково-дослідна лабораторія НДЛ-46 та галузева лабораторія інституту ГНДЛ-88, науковим керівником якої є професор В.Г. Кваша. Відкрита підготовка наукових кадрів через аспірантуру.

Г. Гладішев

Член-кореспондент АБУ, директор НПФ “Реконстрпроект”;

Д. Гладішев

Національний університет “Львівська політехніка”;

І. Бутринський

Національний університет “Львівська політехніка”

МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЗУСИЛЬ У ЕЛЕМЕНТАХ РЕБРИСТОЇ ГРАДИРНІ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЇЇ РОБОТИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

© Гладішев Г., Гладішев Д., Бутринський І., 2010

Запропоновано методи і критерії виведення за аналогією. Ці методи реалізовані у програмній системі Аналогія.

This paper is devoted to the solving task of property prediction on the basis of analogical inference.

У 1982 році була споруджена і здана в експлуатацію градирня №4 в складі Дарницької ТЕЦ в м. Києві.



Рис. 1. Вигляд споруди

Споруда (рис. 1) являє собою збірну залізобетонну біконічну оболонку з циліндричною вставкою та ребром жорсткості по верхньому краю, оперту на нахилену колонаду. Висота споруди 55м, максимальний діаметр – 49м. Сама оболонка зібрана з 400 залізобетонних панелей (10 ярусів по 40 панелей в кожному ярусі) трапецієподібної (в плані) форми завдовжки 5.2 м змінної ширини. Панель оболонки – кесонного типу, утворена чотирма ребрами по периметру з перерізом $b \times h = 190 \times 200 \dots 250$ мм, одним поздовжнім ребром з перерізом $b \times h = 380 \times 200 \dots 250$ мм, двома поперечними проміжними ребрами перерізом $b \times h = 170 \times 200$ мм, об'єднаних стінкою панелі товщиною 45 мм. Горизонтальні (по паралелях) та вертикальні (по меридіанах) стики змонтованих панелей утворюють горизонтальні та вертикальні ребра оболонки перерізом $b \times h = 380 \times 200 \dots 250$ мм. По нижньому контурі оболонка з'єднується з 40 опорними елементами, кожний з яких об'єднує одну пару колон похилої колонади.

Після тривалого безексплуатаційного періоду, у 2003 р. у науковій проектній фірмі “Реконстрпроект” виконано обсте-

ження фактичного стану градирні та виявлено істотні дефекти елементів несучих конструкцій споруди. Через ці обставини першочерговими завданнями були розрахунок зусиль та з'ясування фактичної несучої здатності елементів споруди. При цьому було звернено увагу на особливості роботи конструкції при температурних технологічних та кліматичних навантаженнях споруди у зимовий період.

Особливістю навантаження споруд подібного типу є дія температурного технологічного навантаження.

У більшості методик, які застосовуються при розрахунку тонкостінних ребристих елементів, ребриста структура розглядається як еквівалентна за жорсткісними параметрами однорідна ортотропна плита чи оболонка сталої товщини без ребер.

Температурне навантаження на такий елемент як правило беруть згідно з методикою [1], у якій врахування товщини елементів здійснюється шляхом введення поправок q_1, q_2, q_3 до значень середньої по перерізу температури t_0 та перепаду температури по перерізу q . Зокрема, для залізобетонних елементів, при мінливості товщини елемента в межах 0,...,400 мм, величина кожної з поправок q_1, q_2, q_3 змінюється в межах 0,...,2⁰С (табл. 16 [1]). Примітки до п.8.3 [1] передбачають необхідність розрахунку параметрів розподілу температури по перерізу для багатошарових конструкцій; вказівки щодо ребристих конструкцій відсутні. Отже, згідно з [1] температурне навантаження на ребристу конструкцію розраховується аналогічно як і температурне навантаження на конструкцію без ребер.

Для ілюстрації, у табл. 1 подано результати розрахунку за методикою [1] нормативних значень середньої по перерізу температури t_c та перепаду температури по перерізу q для складових елементів ребристої конструкції розглядуваної споруди під час експлуатації її взимку. Розрахунки виконані для температури зовнішнього повітря $t_{ec} = -20^0\text{C}$ та температури повітря всередині градирні $t_{ic} = 23^0\text{C}$, заданої експлуатаційними параметрами споруди.

Аналіз результатів розрахунку нормативних температур елементів споруди за методикою СНІП [1] (табл. 1) показує, що для зимового періоду нормативні середні (по перерізу) температури для ребер і тонкої стінки плити є практично однаковими: різниця становить 1⁰С. До того ж товщина цих елементів відрізняється істотно (товщина стінки плити 45мм, ребер панелей і стиків – 200 – 250 мм). Стінка плити і ребро панелі в зимовий період перебувають також у істотно різних умовах: для ребер тепловіддача відбувається з трьох граней, температурне поле ребра формується під час взаємодії як з повітрям, так і за рахунок потоку тепла із стінки панелі.

Таблиця 1

**Нормативні температури конструктивних елементів під час експлуатації споруди
взимку і влітку згідно з розрахунком за методикою СНІП 2.01.07.85**

Параметр	Нормативні значення температури, ⁰ С для конструктивних елементів	
	ребра панелі h=200...250мм	стінка панелі (h= 45 мм)
Середня температура по перерізі t_c	-4,8	-5,8
Перепад температури по перерізі q_c	-37,4	-36,4

Ці обставини дозволяють припустити, що для зимового періоду для розглядуваної ребристої структури визначення нормативних значень температур по перерізу елементів за спрощеною методикою [1] не відображає основних особливостей процесів теплообміну елементів ребристої структури і, відтак, не може використовуватися як основа для визначення температурного поля і розрахунків зусиль у споруді у зимовий період.

Мета. 1. Дослідження особливостей температурних полів елементів ребристої структури градирні від температурних дій. 2. Моделювання та розрахунок зусиль у елементах споруди із врахуванням особливостей її роботи при температурному навантаженні.

Розрахунок температурних полів у поперечних перерізах елементів. Під час розрахунку споруди на температурне навантаження в зимовий період розрахункові значення температур по поперечних перерізах стінки панелей, ребер та стиків панелей, монолітного поясу, ребер жорсткості циліндричної частини оболонки визначались із завдань моделювання температурних полів.

Розглядалась двовимірною (плоскою) стаціонарною задачею теплопровідності для термічно однорідних ділянок, які відповідають поперечним перерізам ребер і стиків панелей оболонки та стінки панелі. Приймали, що розподіл температури по поперечному перерізу не залежить від координати X в напрямку вздовж ребра (стику) і є функцією тільки координат Y, Z ; впливом температурного поля одного ребра (стику) на температурне поле іншого ребра (стику) нехтується.

Температурне поле моделювалось рівнянням Лапласа. Умови на внутрішній та зовнішній ділянках границі термічної області задаються як умови вільного теплообміну відповідно:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = a_i(t_i - T_i), \quad \frac{\partial T}{\partial n} = a_o(t_o - T_o), \quad (1)$$

де t_i, t_o – температура внутрішнього та зовнішнього повітря; a_i, a_o – коефіцієнт конвективного теплообміну внутрішньої та зовнішньої поверхонь; T_i, T_o – температура точок перерізу біля внутрішньої та зовнішньої границь, n – нормаль до границі. Прийняті значення температури повітря всередині та зовні: $t_i = 23^\circ\text{C}$, $t_o = -23^\circ\text{C}$. Значення коефіцієнтів конвективного теплообміну: $a_i = 8.7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$, $a_o = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$ [2].

Температурні поля для усіх ребер та стиків кожного поперечного перерізу визначались чисельно, із застосуванням методу скінченних елементів. Результати обчислень розподілу температури по поперечному перерізу ребра жорсткості циліндричної частини оболонки, стику та стінки панелі показано на рис. 3а), по поперечному перерізу ребра та стінки панелі – на рис. 3б). Величина температури подається в $^\circ\text{C}$. Як видно з рисунків, розподіл температури по перерізу стінки та ребра кількісно і якісно істотно відрізняються, розподіл температури по перерізу ребра має нелінійний характер, розподіл температури у стінці панелі – лінійний.

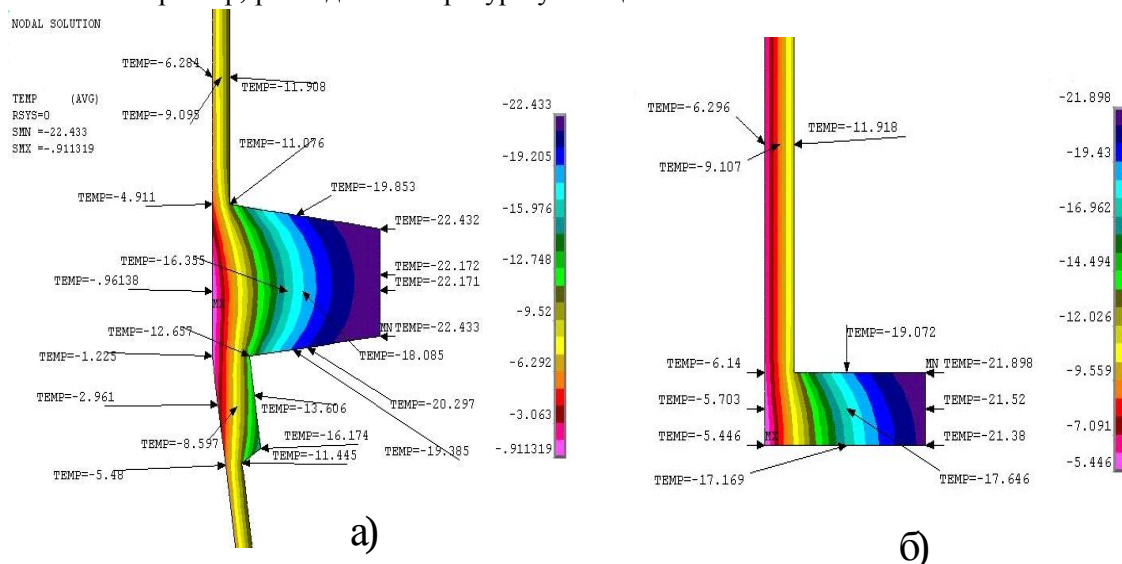


Рис. 2. Розподіл температури по перерізах елементів

Для застосування як навантаження стержневих елементів скінченно-елементної моделі нелінійний розподіл температури по поперечних перерізах ребер піддавався подальшій лінеаризації.

На підставі обчислених значень температури у окремих точках перерізу, шляхом інтегрування визначались середні інтегрально-зважені значення температури t_{cv} , t_{cz} відповідно з внутрішньої та зовнішньої сторін поперечного перетину ребер та середнє інтегрально-зважене значення температури t_{cn} по перерізу ребра. Інтегрування проводилось чисельно.

Лінійна апроксимація температурних деформацій по перерізу стержневих елементів задавалась двома параметрами: температурні деформації стиску–розтягу - середнім значенням температури по перерізу t_{cn} ; температурні деформації згину – перепадом температури $q = t_{cz} - t_{cv}$.

Результати обчислень параметрів лінеаризованого температурного поля по перерізу стінки плити і окремих ребер наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Розподіл температури по перерізах конструктивних елементів споруди в зимовий період згідно з результатами моделювання температурних полів

Компонента	Середні розміри перетину, м		Температура поверхонь, °C					
			Інтегрально-розподілені значення		Лінеаризація			
	h	b	t_{cv}	t_{cz}	$t_{внутр}$	$t_{сер}$	$t_{зовн}$	θ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
стінка панелі	0,045	1,00	-6,30	-11,90	-6,30	-9,10	-11,90	-5,60
горизонтальне ребро	0,25	0,38	-2,25	-19,67	-3,98	-12,69	-21,40	-17,42
вертикальне ребро	0,25	0,27	-3,96	-20,55	-6,18	-14,48	-22,77	-16,59
ребро жорсткості оболонки	0,45	0,31	-1,66	-22,26	-5,70	-15,99	-26,29	-20,59

Розрахункова схема споруди та методика розрахунку зусиль в її елементах. Під час розрахунку споруда загалом розглядалась як оболонково-стержнева система. Панель оболонки розглядалась як тонка плита ексцентрично з'єднана з ребрами. Стінка панелей та монолітний пояс оболонки описувались рівняннями малих деформацій пружних однорідних оболонок. Ребра панелей і стиків, ребра жорсткості циліндричної частини та верхнього поясу, колонада та ригелі похилої колонади описувались рівняннями малих деформацій пружних прямолінійних стержнів. Закріплення колон на нижньому кінці – защемлення; з'єднання колон з ригелем, ригеля з монолітним поясом, монолітного поясу з панелями, панелей між собою та з ребрами жорсткості оболонки – жорстке.

Статичний та динамічний розрахунок проводився з використанням методу скінченних елементів у переміщеннях із застосуванням техніки суперелементів.

У циліндричній системі координат споруда має регулярну циклічно-симетричну структуру відносно осі обертання і ділиться на 80 однакових сегментів.

Під час розрахунку брали до уваги навантаження від власної ваги конструкцій, від ваги опадів, вітрові, температурні технологічні та температурні кліматичні навантаження для літнього та зимового періодів при експлуатації та за відсутності експлуатації споруди.

Для числового розрахунку споруди використовувалось три моделі, які відрізняються одна від одної обсягом врахування симетрії.

Модель А – половина циклічного сегмента споруди. Врахування циклічної симетрії споруди з відповідними граничними умовами симетрії на краях (вертикальних твірних) сегмента. Використовується під час статичного розрахунку на дію навантажень від власної ваги, ваги снігу та температурну дію.

Скінченно-елементна модель А будувалась з трьох типів скінченних елементів (далі СЕ):

- 1) 4-вузловий ізопараметричний СЕ оболонки типу С.П.Тимошенка з 6-ма ступенями вільності у вузлі (3 переміщення і 3 повороти);
- 2) 2-вузловий прямолінійний ермітовий кубічний стержневий СЕ з 6-ма ступенями вільності у кожному вузлі (3 переміщення і 3 повороти);
- 3) 2-вузловий абсолютно жорсткий прямолінійний СЕ з 6-ма ступенями вільності (3 переміщення і 3 повороти).

Модель враховує ексцентричне зміщення стінки панелі відносно ребер.

У моделі використовується сітка елементів із незначним згущенням внизу оболонки. Монолітний пояс (2 нижніх ряди оболонкових СЕ) і стінка панелі моделюється СЕ 1-го типу, причому для врахування товщини оболонки використовується методика скороченого інтегрування [5], ребра і стики панелей, ребра жорсткості циліндричної частини та верхнього поясу оболонки, колони та ригелі похилої колонади – елементами 2-го типу. Зміщення серединної площини стінки плити відносно осі ребер та зміщення ребер жорсткості оболонки відносно осі вертикальних ребер забезпечується використанням елементів 3-го типу.

Модель В – половина споруди. Врахування симетрії споруди відносно вертикальної площини, у якій лежить вектор напрямку вітрового навантаження. Використовується під час статичного розрахунку на дію вітрового навантаження. Значення обвідних зусиль у скінченному елементі репрезентативної половини сегмента при різних напрямках вітру отримувались за допомогою вибірки по всіх сегментах моделі з множини скінченних елементів, положення яких збігається з положенням елемента у репрезентативній моделі А половини сегмента;

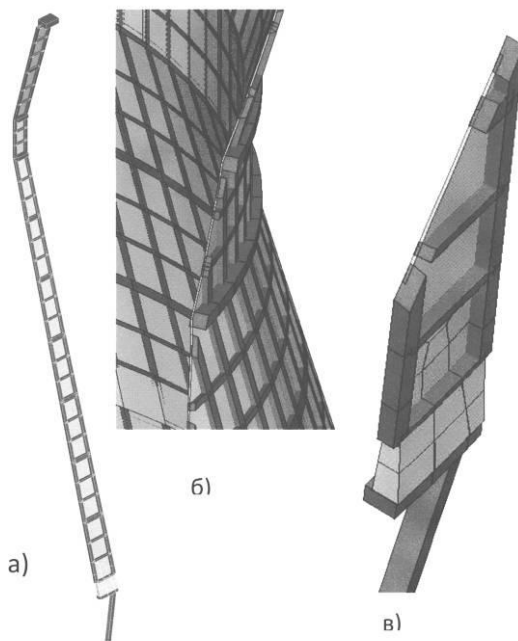
Модель С – скінченно-елементна модель усієї споруди. Використовується під час розрахунку споруди на власні коливання.

Моделі В і С будували на основі моделі А з подальшим застосуванням техніки суперелементів [6]. Модель А показана на рис.3а), фрагменти моделі А, В з показаними перерізами елементів та їх взаємним ексцентричним розташуванням показані на рис.3б), в).

Під час розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь застосовувався фронтальний алгоритм [7]. У разі динамічного розрахунку власні значення обчислювали з використанням методу ітерацій півпростору [8].

Результати розрахунку зусиль у елементах споруди. На рис. 4 показано діаграми максимальних поздовжніх внутрішніх сил у горизонтальних ребрах стиків панелей та ребрах жорсткості оболонки від температурного навантаження, а також, для порівняння, від дії інших навантажень та поєднань.

Номери по осі абсцис вказують на номер яруса панелей, який розташований вище від ребра стика. Точки на діаграмі, які відповідають номерам ярусів 8, 9, умовно позначають зусилля у нижньому та верхньому ребрах жорсткості циліндричної вставки відповідно, 12 – зусилля у верхньому ребрі жорсткості оболонки. У легенді до діаграми використано такі позначення навантажень та комбінацій: G – зусилля від нормативного навантаження від власної ваги; $W_{\max}$ – максимальні (з врахуванням знака) зусилля від дії нормативного вітрового навантаження (вибірка з 40 напрямів вітру); Tz – зусилля від дії нормативних температурних технологічних та кліматичних навантажень у разі експлуатації споруди у зимовий період; $R_{\max}$ – максимальні (з врахуванням знака) зусилля від розрахункового поєднання навантажень у разі експлуатації споруди у зимовий період; $R_{\max}$ без експлуатації взимку – максимальні (з врахуванням знака) зусилля від



розрахункового поєднання навантажень у разі призупинення експлуатації споруди у зимовий період. Величини зусиль подаються у ньютонх Н.

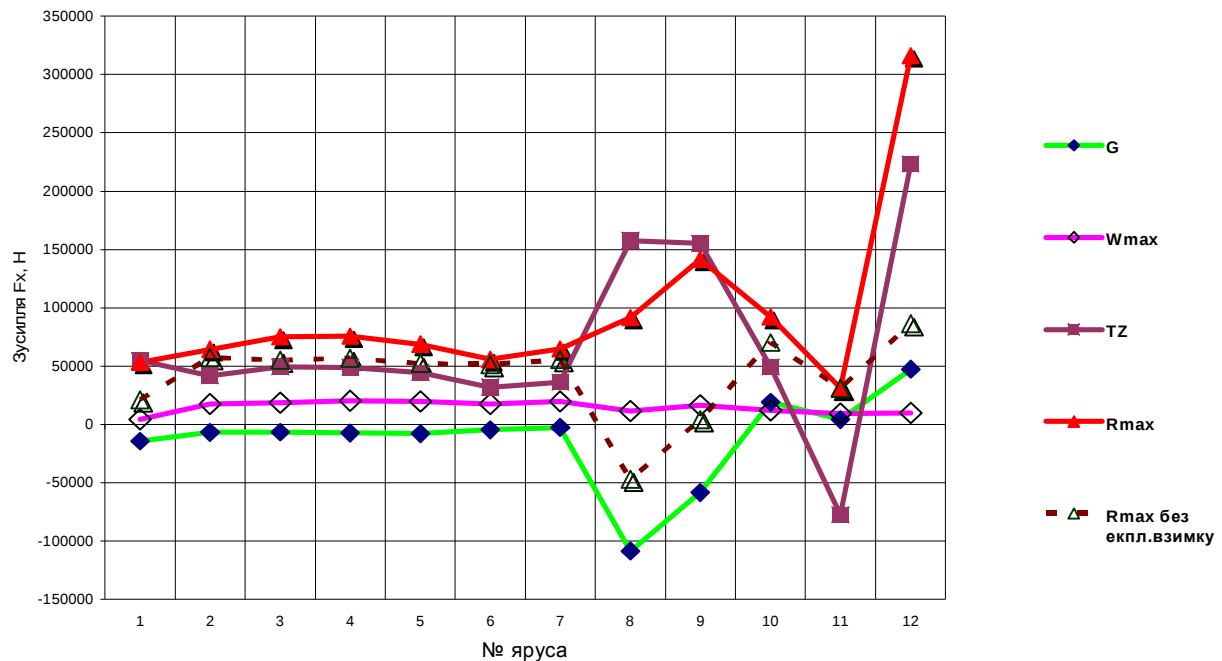


Рис. 4. Максимальні зусилля F_x у горизонтальних ребрах стиків

Необхідно також зауважити, що у разі застосування для опису поведінки оболонки співвідношень теорії безмоментних оболонок, через статичну визначеність задачі, мембранні зусилля від температурної дії дорівнюватимуть нулю, а отже, й величини розрахункових розтягуючих зусиль у ребрах оболонки будуть значно знижені.

Висновки. На підставі аналізу результатів розрахунків встановлено:

- у зимовий період температурне технологічне навантаження зумовлює виникнення істотних розтягувальних поздовжніх зусиль як в горизонтальних ребрах так у вертикальних ребрах споруди а також у ребрах жорсткості;
- вказані зусилля виникають за рахунок особливостей температурних полів у поперечному перерізі ребер та стінки плити, за яких температурні деформації теплового розширення у стінці плити в напрямі вздовж ребра більші, ніж відповідні деформації у ребрі;
- при дії температурних навантажень на конструктивні елементи ребристої структури необхідно враховувати можливість виникнення додаткових зусиль за рахунок неоднорідності температурного поля по поперечному перерізу елементів.

1. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07.85. –М.,1986. –57с.
2. СНиП II-3-79**. Строительная теплотехника. - М.: Госстрой СССР, 1979. - 32 с.
3. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика. - М.: Госстрой СССР, 1982. - 320 с.
4. Корсун В.И., Мащенко А.Н., Калмыков Ю.Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных оболочек градирен // Вісник ДДАБА. - 2001. – №5(30). – С.201–205.
5. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. - Харьков: Основа, 1991. – 272 с.
6. ANSYS Theory Reference. Twelfth Edition. SAS IP, Inc. Canonsburg, 1994.
7. Thomas P.D.,Brown R.A. LU-decomposition of matrices with augmented dense constants// Intern. J.Numerical Methods Eng. – 1987, - V24, №8. – P.1451-1459.
8. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений: численные методы. – М.: Мир, 1983. – 384 с.