

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ РЕБРИСТОЇ ГРАДИРНІ

© Бутринський І.З., Гладішев Г.М., 2006

Розглянуто дію температурного навантаження на елементи ребристої залізобетонної градирні. З використанням скінченно-елементного моделювання досліджено розподіл температури та напружено-деформований стан елементів споруди.

The modeling of reinforced concrete cooling tower is given on the base of FEM. The thermostressed state of stiffening ribs is investigated.

Формулювання проблеми

Споруда збірної ребристої градирні №4 Дарницької ТЕЦ у м. Києві (рис.1) являє собою збірну залізобетонну біконічну оболонку з циліндричною вставкою та ребром жорсткості по верхньому краю, оперту на нахилену колонаду. Висота споруди – 55 м, максимальний діаметр – 49 м. 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 4-ма ребрами по периметру з перерізом $b \times h = 190 \times 200 \dots 250$ мм, 1-м поздовжнім ребром з перерізом $b \times h = 380 \times 200 \dots 250$ мм, 2-ма поперечними проміжними ребрами перерізом $b \times h = 170 \times 200$ мм, об'єднаними стінкою панелі завтовшки 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 контуру оболонка з'єднується з 40 опорними елементами, кожний з яких об'єднує одну пару колон похилої колонади.



Рис. 1. Вигляд споруди

Після тривалого безексплуатаційного періоду спеціалістами науково-проектної фірми “Реконструктпроект” виконано обстеження 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 зверталась увага на особливості роботи конструкції за температурних технологічних та кліматичних навантажень споруди у зимовий період.

Особливістю навантаження споруд подібного типу є дія температурного технологічного навантаження.

У більшості методик, які застосовуються під час розрахунку тонкостінних ребристих елементів, ребриста структура розглядається як еквівалентна за жорсткішими параметрами однорідна ортотропна оболонка постійної товщини без ребер.

Температурне навантаження на такий елемент, як правило, береться за методикою [1], у якій врахування товщини елементів здійснюється введенням поправок $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ до значень середньої по перерізу температури t_0 та перепаду температури по перерізу θ . Зокрема, для залізобетонних елементів за мінливості товщини елемента в межах 0, ..., 400 мм величина кожної з поправок

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ змінюється в межах $0, \dots, 2$ °C (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 так само, як і температурне навантаження на конструкцію без ребер.

Для ілюстрації (табл. 1) подано результати розрахунку за методикою [1] нормативних значень середньої по перерізу температури t_c та перепаду температури по перерізу θ для складових елементів ребристої конструкції розглядуваної споруди під час експлуатації її взимку. Розрахунки виконані для температури зовнішнього повітря $t_{ec} = -20$ °C та температури повітря всередині градирні $t_{ic} = 23$ °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 1 °C. В той самий час товщина цих елементів відрізняється істотно: товщина стінки плити – 45 мм, ребер панелей і стиків – 200 – 250 мм. Стінка плити і ребро панелі в зимовий період перебувають також в істотно різних умовах: для ребер тепловіддача відбувається з трьох граней, температурне поле ребра формується в процесі взаємодії як з повітрям, так і за рахунок потоку тепла із стінки панелі.

Таблиця 1

**Нормативні температури конструктивних елементів
під час експлуатації споруди взимку згідно з розрахунком
за методикою СНІП 2.01.07-85**

Параметр	Нормативні значення температури, °C для конструктивних елементів	
	ребра панелі h=200–50 мм	стінка панелі (h= 45 мм)
Середня температура по перерізу t_c	-4,8	-5,8
Перепад температури по перерізу θ_c	-37,4	-36,4

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

Мета роботи – дослідження особливостей температурних полів елементів ребристої структури градирні від температурних дій; моделювання та розрахунок зусиль в елементах споруди із врахуванням особливостей її роботи за температурного навантаження.

Моделювання температурних полів в 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 пояса, ребер жорсткості циліндричної частини оболонки визначались із задач моделювання температурних полів.

Розглядалась двовимірна (плоска) стаціонарна задача теплопровідності для термічно однорідних областей, які відповідають поперечним перерізам ребер і стиків панелей оболонки та стінки панелі. При цьому приймалось, 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:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_i(t_i - T_i); \quad \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_o(t_o - T_o); \quad (1)$$

де t_i, t_o – температура внутрішнього та зовнішнього повітря; α_i, α_o – коефіцієнт конвективного теплообміну внутрішньої та зовнішньої поверхонь; T_i, T_o – температура точок перерізу біля внутрішньої та зовнішньої границі; n – нормаль до границі. Прийняті значення температури повітря всередині та зовні: $t_i = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_o = -23 \text{ }^\circ\text{C}$. Значення коефіцієнтів конвективного теплообміну: $\alpha_i = 8.7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{ }^\circ\text{C})$, $\alpha_o = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{ }^\circ\text{C})$ [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. 2, а, по поперечному перерізу ребра та стінки панелі – на рис. 2, б. Величина температури TEMP подається в $^\circ\text{C}$.

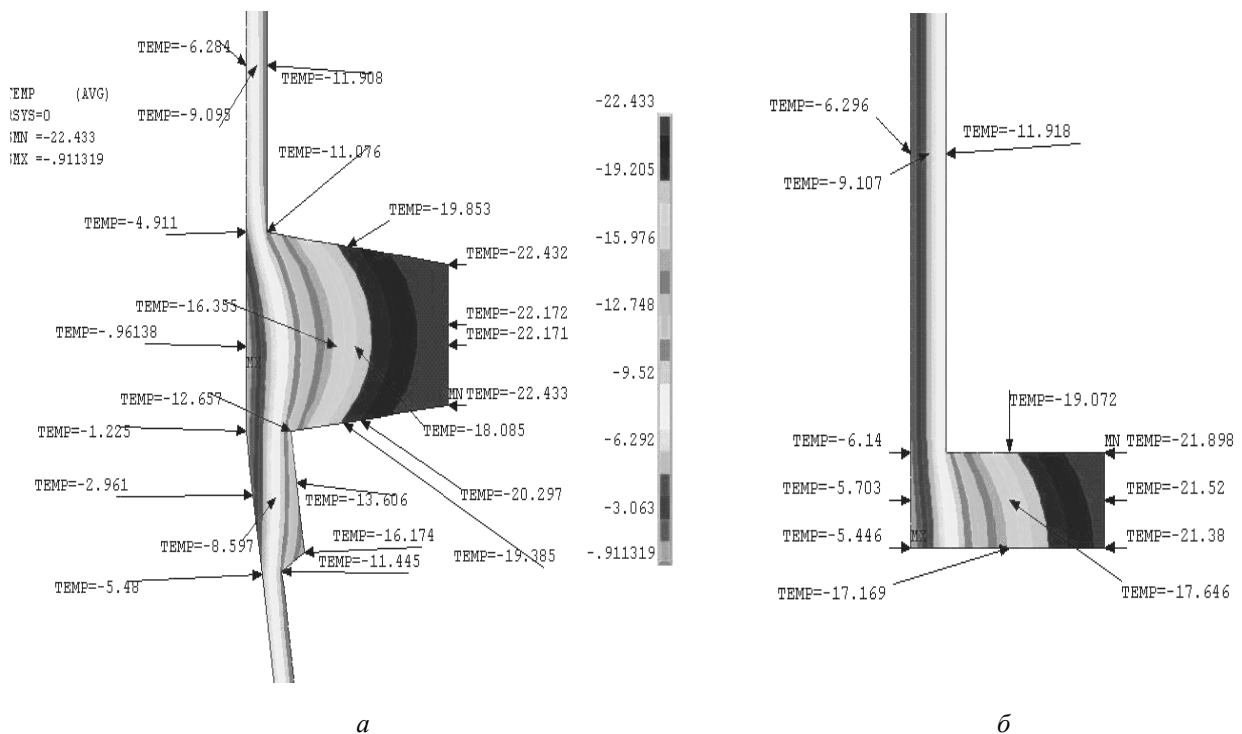


Рис. 2. Розподіл температури по перерізу конструктивних елементів:
 а – ребро жорсткості оболонки і стінка;
 б – ребра та стінки панелі

Як зрозуміло з рис. 2, 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.

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

На підставі обчислених значень температури в окремих точках перерізу інтегруванням визначались середні інтегрально-зважені значення температури t_{cs} , t_{cs} відповідно з внутрішнього та зовнішнього боку поперечного перетину ребер та середнє інтегрально-зважене значення температури t_{cn} по перерізу ребра. Інтегрування проводилось числовим способом.

Лінійна апроксимація температурних деформацій по перерізу стрижневих елементів задавалась двома параметрами: температурні деформації стиску-розтягу – середнім значенням температури по перерізу t_{cs} ; температурні деформації згину – перепадом температури $\theta = t_{cs} - t_{cb}$.

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

Таблиця 2

Розподіл температури по перетину конструктивних елементів споруди в зимовий період за результатами моделювання температурних полів

Компонента	Середні розміри перетину, м		Температура поверхонь, °С					
			інтегрально-розподілені значення		лінеаризація			
	h	b	t _{cb}	t _{cs}	t _в	t _с	t _з	q
<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8	9
Стінка панелі		0,045	-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

Методика розрахунку зусиль в елементах споруди

Під час розрахунку споруда загалом розглядалась як оболонково-стрижнева система. Панель оболонки розглядалась як тонка плита ексцентрично поєднана 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 пояса, колонада та ригелі похилої колонади описувались рівняннями малих деформацій пружних прямолінійних стрижнів. Закріплення колон на нижньому кінці – защемленням; з'єднання колон з ригелем, ригеля з монолітним поясом, монолітного пояса з панелями, панелей між собою та з ребрами жорсткості оболонки – жорстке.

Статичний та динамічний розрахунки проводились з використанням методу скінченних елементів в переміщеннях із застосуванням техніки суперелементів.

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

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

Для числового розрахунку споруди використовувалось три різновиди моделі (рис. 3), 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) чотиривузлового ізопараметричного СЕ оболонки типу С.П. Тимошенка;
- 2) двовузлового прямолінійного ермітового стрижневого СЕ;
- 3) двовузлового абсолютно жорсткого прямолінійного СЕ з шістьма ступенями вільності (три переміщення і три повороти).

Модель враховує ексцентричне зміщення стінки панелі щодо ребер.

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

Модель Б – половина споруди. Врахування симетрії споруди щодо вертикальної площини, у якій лежить вектор напрямку вітрового навантаження. Використовується за статичного розрахунку на дію вітрового навантаження. Значення огинаючих зусиль у скінченному елементі репрезентативної половини сегмента за різних напрямків вітру отримувались шляхом вибірки по усіх сегментах моделі з множини скінченних елементів, положення яких збігається з положенням елемента у реперзентативній моделі А половини сегмента;

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

Моделі Б і В будувались на основі моделі А з подальшим застосуванням техніки супер-елементів [6]. Модель А показана на рис. 3, а, фрагменти моделі Б, В з показаними перерізами елементів та їх взаємним ексцентричним розташуванням – на рис. 3, б, в.

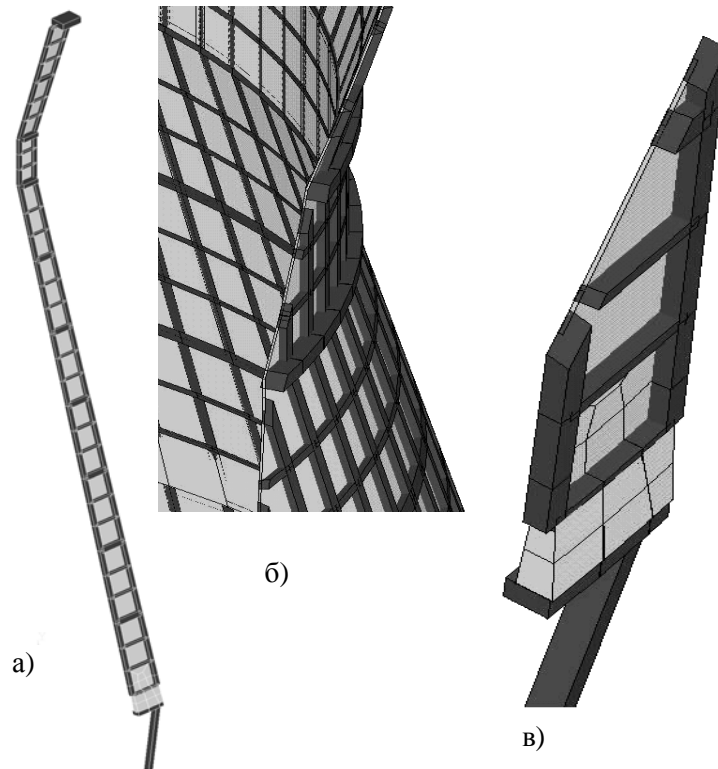


Рис. 3. Скінченно-елементна модель

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

Результати розрахунку зусиль в елементах споруди

Епюри обчислених 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 показано на рис. 4 (зліва зображено профіль серединної поверхні градирні).

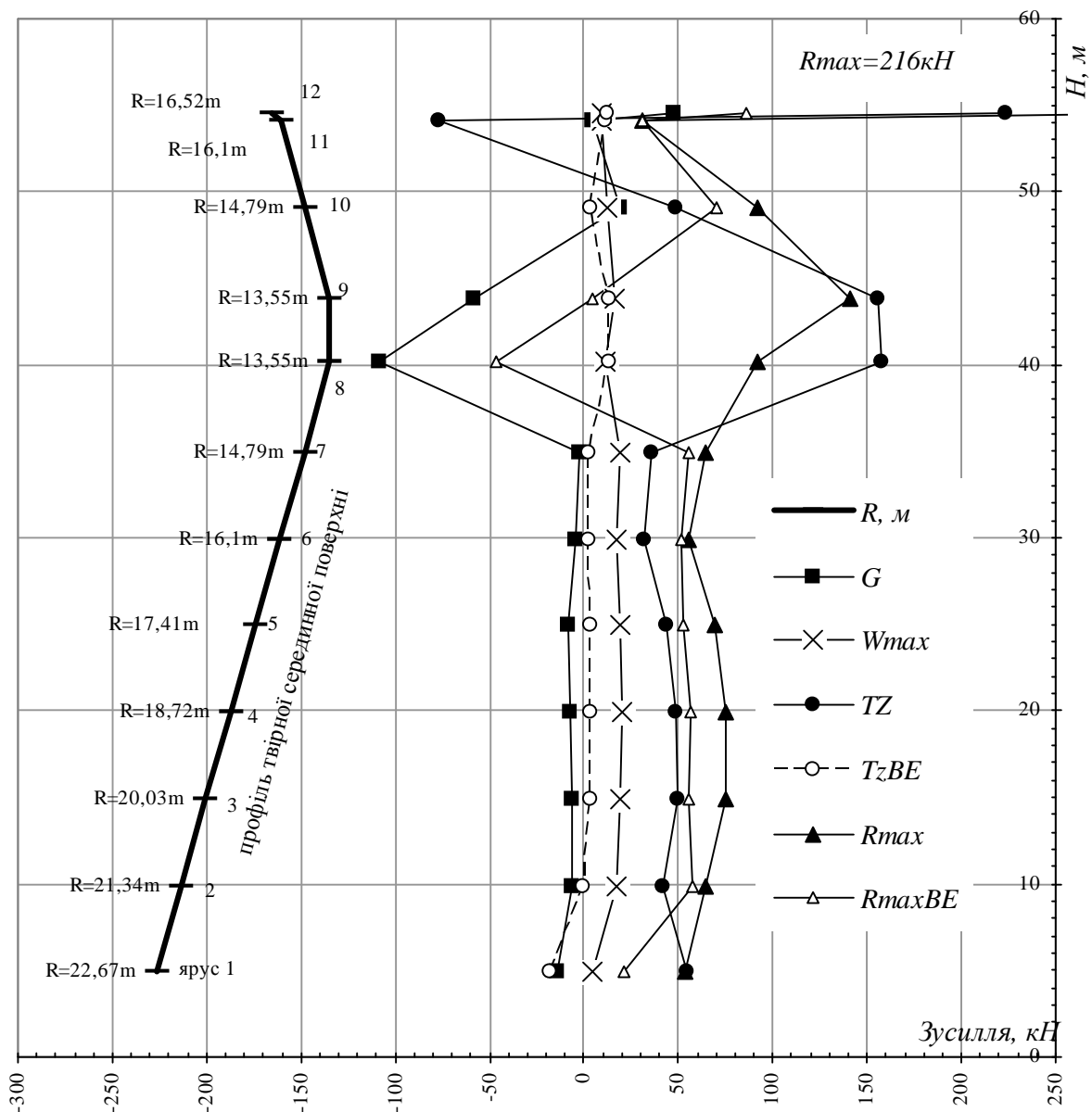


Рис. 4. Епюри поздовжніх внутрішніх зусиль у горизонтальних ребрах панелей та ребрах жорсткості оболонки

У легенді до епюр використано такі позначення навантажень та комбінацій: G_i – зусилля від нормативного навантаження від власної ваги; W_{max_i} – максимальні (з врахуванням знака) зусилля від дії нормативного вітрового навантаження (вибірка з 40 напрямків вітру); Tz_i – зусилля від дії нормативних температурних технологічних та кліматичних навантажень під час експлуатації споруди у зимовий період; $TzBe_i$ – зусилля від дії нормативних температурних технологічних та кліматичних навантажень під час зупинки експлуатації споруди у зимовий період; R_{max_i} – максимальні (з врахуванням знака) зусилля від розрахункового поєднання навантажень при експлуатації споруди у зимовий період; R_{maxBe_i} – максимальні (з врахуванням знака) зусилля від розрахункового поєднання навантажень під час зупинки експлуатації споруди у зимовий період. Величини зусиль подаються у кН. Великою H_i позначено координату по висоті, м. Зліва від епюр показано профіль твірної лінії середньої поверхні градирні (у легенді позначений літерою R_i).

Необхідно також зауважити, що у разі застосування для опису поведінки ребристої оболонки співвідношень теорії безмоментних оболонок без врахування розглядуваних особливостей роботи за температурного навантаження, як зокрема це зроблено під час проектування споруди [4], величини розрахункових зусиль розтягу у ребрах оболонки будуть значно заниженими.

Висновки

На підставі моделювання та аналізу результатів розрахунків встановлено:

– у зимовий період температурне технологічне навантаження зумовлює виникнення істотних поздовжніх зусиль розтягу в горизонтальних ребрах, а також у ребрах жорсткості споруд подібного типу; під час проектування розглядуваної споруди ці зусилля не враховані;

– 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 напрямку вздовж ребра більші, ніж відповідні деформації у ребрі;

– за дії температурних навантажень на одну з поверхонь конструктивних елементів ребристої структури з несиметрично виступаючими ребрами і істотній різниці товщин ребра та стінки необхідно додатково враховувати можливість виникнення зусиль за рахунок неоднорідності температурного поля по поперечному перерізу елементів.

1. *Нагрузки и воздействия. СНиП 2.01.07.85.* – М., 1986. – 57 с. 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. *Доценко Н.Н. Строительство сборной железобетонной градирни.* – К.: Госстройиздат УССР, 1961. – 39 с. 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.

УДК 624.21

Б.Г. Гнідець, О.З. Гнідець

Національний університет “Львівська політехніка”

ЗБІРНО-МОНОЛІТНІ ЗАЛІЗОБЕТОННІ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНІ ПРОГОНОВІ БУДОВИ МОСТІВ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА МЕТОДОМ ПОЗДОВЖНЬОГО НАСУВАННЯ

© Гнідець Б.Г., Гнідець О.З., 2006

Наведено результати дослідження і опрацювання збірно-монолітних попередньо напружених залізобетонних мостів для будівництва методом поздовжнього насунання.

The article provides the results of the research and working aut composite multi-span prestressed reinforced concrete bridges for its building with application longwise approach.

Вступ

Будівництво мостів методом поздовжнього насунання широко застосовується при середніх і великих прогонах. У деяких випадках застосування цього методу може бути не тільки конкурентоспроможним порівняно з іншими методами, а часом навіть одним з можливих. Такі випадки зустрічаються часто під час будівництва мостів через ріки в гірській місцевості, на яких можуть виникати раптові повені, а також під час будівництва високих віадуків та шляхопроводів на дорогах з інтенсивним безперервним рухом транспорту.

Однією з основних вимог до конструкцій мостів, під час будівництва яких можливе застосування методу поздовжнього насунання, є нерозрізність прогонових будов. Тому застосування цього методу для малих і середніх мостів типових конструкцій, в яких прогонова будова виконується переважно розрізною, неможливе. Одним з вирішень цієї проблеми може бути перехід до застосування збірно-моно-