

І.З. Бутринський, Г.М. Гладішев  
 Національний університет "Львівська політехніка",  
 кафедра будівельної механіки,  
 науково-проектна фірма "Реконстрпроект"

## СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ ГРАДИРНІ

© Бутринський І.З., Гладішев Г.М., 2004

*Розглянуто розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) залізобетонної градирні з використанням методу скінчених елементів. Досліджено вільні коливання та вплив мінливості жорсткісних параметрів опорних колон на НДС елементів споруди.*

**Вступ.** На початку 80-х років ХХ ст. була споруджена і здана в експлуатацію градирня № 1 (рис. 1) у складі ТЕЦ-6 в м. Києві. Проектування здійснювалось Ленінградським відділенням Теплоенергопроект [1]. Висота споруди 82 м, максимальний діаметр – 68 м. Споруда є монолітною осесиметричною залізобетонною оболонкою з ребром жорсткості по верхньому краю, оперту на нахилену колонаду. Товщина оболонки по висоті змінюється від 500 до 170 мм, стінка оболонки має вертикальні потовщення на 6 см. По нижньому контурі оболонка жорстко з'єднується з 36 опорними елементами заввишки 0,7 м, кожний з яких об'єднує одну пару колон нахиленої колонади.



Рис. 1. Вигляд споруди

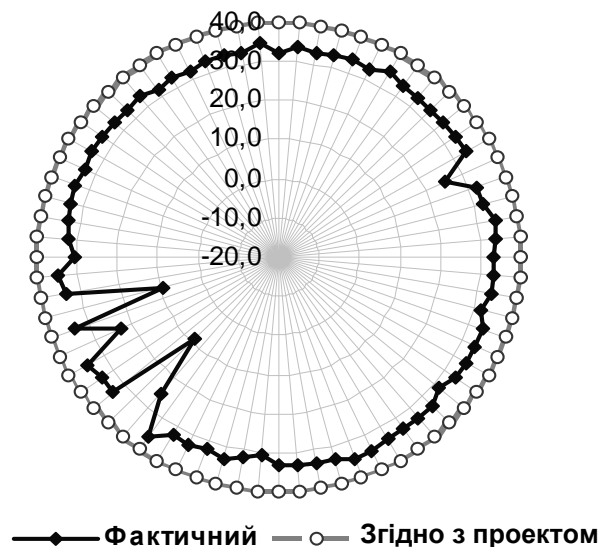


Рис. 2. Мінливість початкового модуля пружності колон, ГПа

У 2001 р. спеціалістами науково-проектної фірми "Реконстрпроект" обстежено фактичний стан градирні з інструментальним дослідженням залізобетону несучих конструкцій споруди. У результаті проведених обстежень, зокрема, встановлено відхилення та мінливість міцнісних характеристик бетону від проектних значень у колонах нахиленої колонади градирні. Середня міцність  $R_{15,m}$  коливається від 20,84 МПа до 45,32 МПа [2], що відповідає класу бетону В15...В35 при проектному класі В32.5 [1], зміна початкового модуля пружності бетону колонади градирні показана на рис. 2. Через ці обставини першочерговим завданням був розрахунок зусиль у елементах несучої конструкції градирні із врахуванням істотної мінливості жорсткісних параметрів колон.

**Розрахункова схема споруди та методика розрахунку.** Припускаючи малий вплив зумовленої ребристими потовщеннями конструктивної ортотропії на жорсткісні параметри і напружено-деформований стан у нижній частині оболонки, при розрахунку приймалась оболонка без ребрих потовщень з еквівалентною приведеною товщиною, змінною за висотою.

Серединна поверхня оболонки градирні вище від відмітки 5,0 м є гіперболічною оболонкою обертання. Напружений стан такої оболонки є безмоментним тільки за умови дії вертикального навантаження та відповідного закріплення по нижньому контурі. Розглядувана оболонка зазнає дії вітрового тиску є пружно-защемлена вздовж окремих ділянок нижнього контуру, пружні властивості опор характеризуються неоднорідністю. Внаслідок цих факторів у нижній частині самої оболонки можуть виникати істотні згинні зусилля.

Під час розрахунку оболонка градирні і опорні елементи оболонки описувались рівняннями малих деформацій тонких пружних однорідних оболонок. Колони описувались рівняннями малих деформацій пружних прямолінійних стрижнів. Приймалось, що з'єднання стрижнів з оболонкою абсолютно жорстке, закріплення стрижнів (колон) на нижньому кінці (рівень фундаменту) – жорстке зацімлення.

Статичний та динамічний розрахунок проводився з використанням методу скінченних елементів у переміщеннях. У циліндричній системі координат оболонка споруди має регулярну структуру в напрямку кутової координати  $\varphi$  і ділиться на 72 однакові сегменти. Ця обставина була використана для істотного збільшення ефективності обчислювального алгоритму застосуванням техніки суперелементів.

Під час розрахунку приймалися до уваги навантаження від власної ваги конструкцій; вітрові, температурні технологічні та температурні кліматичні навантаження. Для зручності задання вітрового навантаження коефіцієнт  $k$  зміни вітрового тиску за висотою та коефіцієнт пульсацій  $\zeta = \zeta(z)$  апроксимувалися степеневими залежностями, коефіцієнт  $c = c(\varphi)$  зміни вітрового тиску по кутовій координаті  $\varphi$  зображався рядом Фур'є.

**Скінченно-елементна модель** будувалась з 4-х типів скінченних елементів. Застосовано нерівномірну сітку скінченних елементів (СЕ): у нижній частині – густа сітка з 5-ти рядів 8-и вузлових ізопараметричних біквадратних СЕ оболонки типу С.П. Тимошенка з 6-ма ступенями вільності у кожному вузлі (3 переміщення і 3 повороти); на решті оболонки – сітка із розрідженням вгору із 4-х вузлових ізопараметричних білінійних СЕ оболонки типу С.П.Тимошенка з 6-ма ступенями вільності у кожному вузлі. Для спряження різних типів оболонкових елементів використано один ряд оболонкових СЕ редукованої форми, отриманих з 8-и –вузлового елемента усуненням проміжного вузла посередині однієї сторони. Для врахування тонкості оболонки застосовано методику скороченого інтегрування [3].

Колони моделювались стрижневими прямолінійними двовузловими ермітовими кубічними СЕ з 6-ма ступенями вільності у кожному вузлі. З'єднання стрижневих елементів з оболонковими здійснювалось із використанням абсолютно жорстких прямолінійних 2 вузлових СЕ з 6-ма ступенями вільності у вузлі.

На основі описаних типів оболонкових СЕ та абсолютножорстких СЕ виключенням внутрішніх вільностей [4] побудовано суперелемент сегмента оболонки, показаний на рис. 3, а. На основі 72 суперелементів сегмента побудовано один суперелемент оболонки.

У підсумку, внаслідок процедури виключення внутрішніх вільностей оболонки, скінченно-елементна модель із 11952 елементів з ступенем вільності 121614 редукована до одного суперелемента оболонки з ступенем вільності 432 із 72 зовнішніми вузлами до яких приєднується 72 стрижневих елементи колон.

Сітка елементів дискретизації всієї споруди (внутрішні СЕ суперелемента оболонки та елементи колон) показано на рис. 3, б, в.

Різні напрямки вітрового навантаження отримуються поворотом суперелемента оболонки відносно колон на кут  $\varphi_0$ , кратний  $10^0$  (крок пари колон).

Під час розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь застосовувався фронтальний алгоритм [5]. При динамічному розрахунку власні значення обчислювались з використанням методу ітерацій півпростору [6].

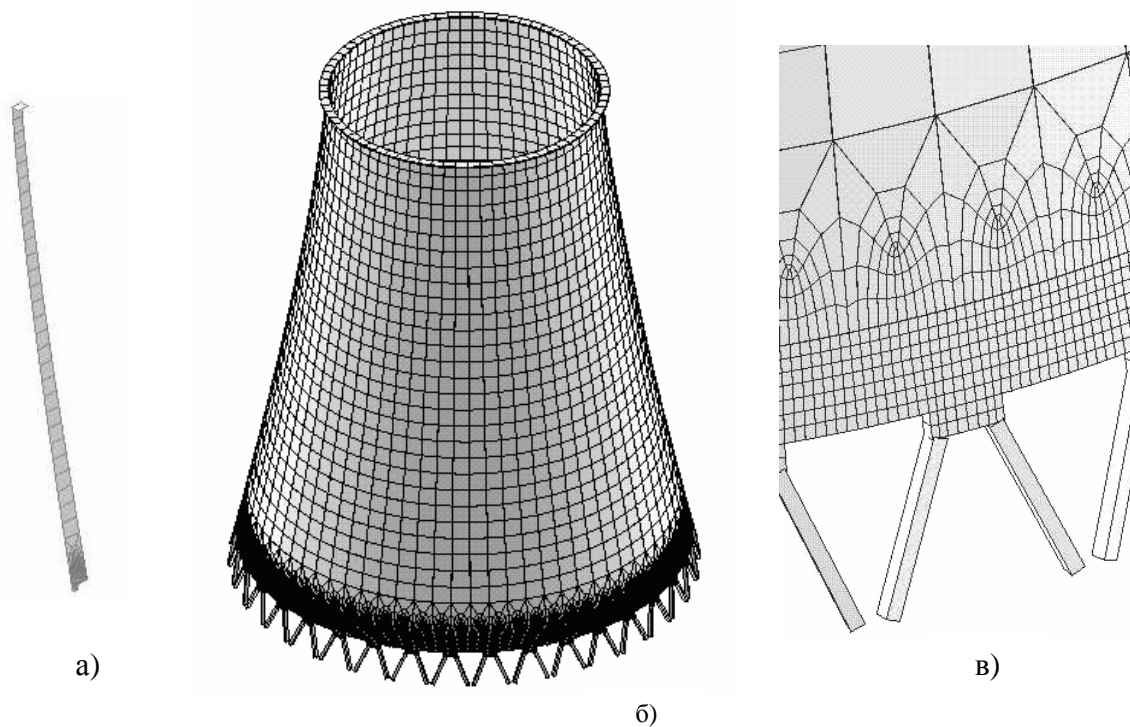


Рис. 3. Сітка скінченних елементів моделі

**Результати розрахунку.** Числові розрахунки споруди проводились для двох варіантів: 1-й варіант – згідно з проектом - модель споруди із колонами з однаковими жорсткісними характеристиками відповідно до проектної документації; 2-й варіант – згідно з фактичним станом – модель споруди із колонами з жорсткісними параметрами згідно з даними обстеженнями, поданими раніше на рис. 2.

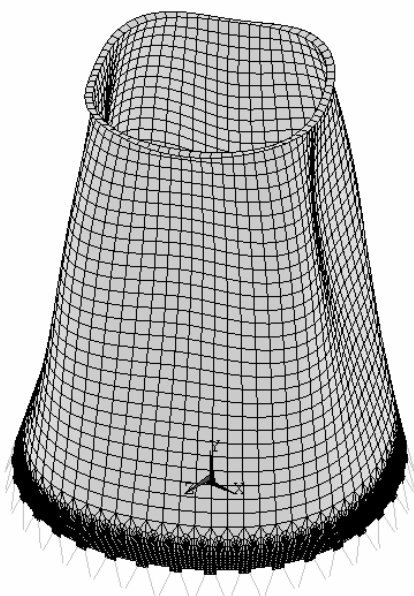


Рис. 4. Форма коливань

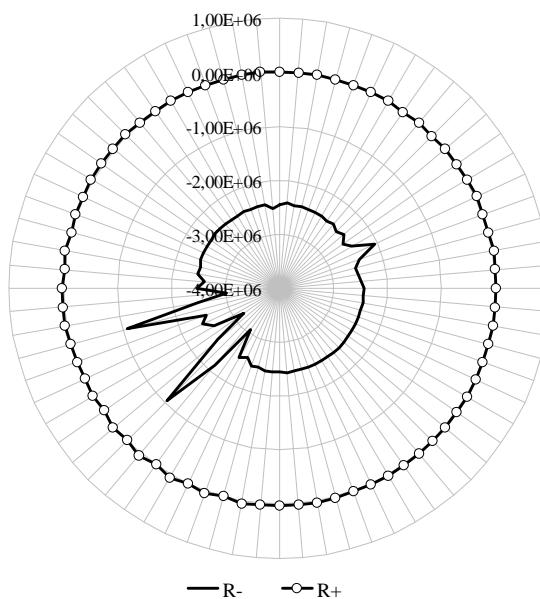


Рис. 5. Поздовжні розрахункові зусилля у колонах,  $H$

Розрахунок на власні коливання, необхідний для визначення діючого вітрового навантаження, проводився тільки для моделі згідно з проектом. У результаті розрахунку обчислена перша частота власних коливань становить 1,36 Гц, форма коливань, що відповідає цій частоті, показана на рис. 4.

Окремі результати статичного розрахунку зусиль у споруді для 2-х варіантів моделей подаються на рис. 5, 6. На рис. 5 показано діаграми розрахункових значень внутрішніх поздовжніх зусиль у колонах для 2-го варіанта моделі. Значення зусиль, позначені як R- та R+, відповідають мінімальним та максимальним (з врахуванням знака) зусиллям від дії розрахункових комбінацій навантажень згідно з [8], величина зусиль подається у Ньютонах. У трьох найбільш стиснутих колонах стискаючі зусилля становлять 3,07 МН, 3,20 МН, 3,02 МН. Для порівняння, у випадку 1-го варіанта моделі (проектного) розрахункові поздовжні зусилля в усіх колонах однакові і становлять: мінімальні -2,45 МН (стискаючі), максимальні +5,05 кН.

На рис. 6 подаються еквівалентні розрахункові максимальні (розтягуючі) зусилля  $\max F_x$  та згинні моменти  $\min M_x$ , які виникають у нижньому поясі оболонки на висоті 5,18 м у перетинах, нормальних до її паралелей; моменти розтягують зовнішні волокна оболонки. На рисунку товста чорна крива показує напруження у випадку 2-го варіанта моделі (фактичного стану колон). Товстою сірою кривою показано напруження у випадку 1-го варіанта моделі (проектного). Зусилля  $\max F_x$ ,  $\min M_x$  подаються в Н/м та Нм/м, відповідно.

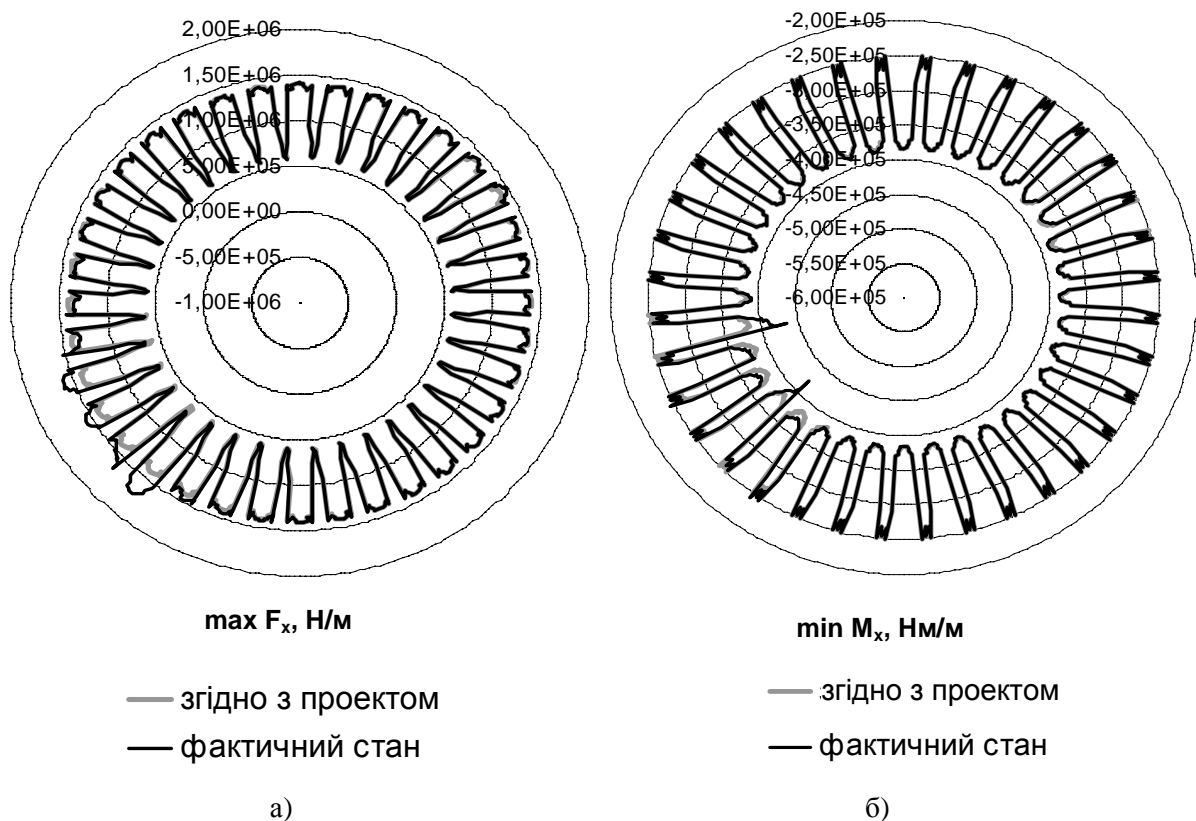


Рис. 6. Епюри розрахункових зусиль у нижньому поясі оболонки

Аналіз результатів розрахунку напруженого стану колон та оболонки показує істотне збільшення зусиль та напружень в окремих колонах та перетинах оболонки при зміні жорсткісних параметрів матеріалу окремих колон. На підставі числових результатів скінченно-елементного аналізу та міцнісних розрахунків спрогнозовано поведінку споруди та розроблено заходи для забезпечення її подальшої експлуатації.

1. Градирня площею орошення 3200 м<sup>2</sup> з залізобетонною башнею в скользящей опалубке (Рабочий проект). – Ленинград: Теплоэнергопроект. Ленинградское отделение, 1980. 2. Гладишев Г.М. Перерозподіл зусиль у нижньому контурі оболонки залізобетонної градирні вид фактичної

жорсткості колон нахиленої колонади // Вісн. Донецької державної академії будівництва та архітектури. – 2001. – Т.30. – №5. – С. 82–85. 3. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. - Харьков: Основа, 1991. – 272с. 4. ANSYS Theory Reference. Twelfth Edition. SAS IP, Inc. Canonsburg, 1994. 5. Thomas P.D., Brown R.A. LU-decomposition of matrices with augmented dense constants // Intern. J. Numerical Methods Eng. – 1987. – Vol. 24. – № 8. – P. 1451 – 1459. 6. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений: численные методы. – М.: Мир, 1983. – 384 с. 7. Siwec P., Szechinski M. Simulation of cooling tower collapse on the basis of non-linear FEM analysis. The 7<sup>th</sup> Conference "Shell Structures. Theory and Applications". – Gdansk, 2002. – P.213–214. 8. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07.85. – М., 1986. – 57с.

УДК 696.4:697.34

В.І. Венгльовський

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра теплогазопостачання і вентиляції

## ПЕРЕРИВИСТА ЦИРКУЛЯЦІЯ ВОДИ І ТЕПЛОВТРАТИ У СИСТЕМІ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

© Венгльовський В.І., 2004

*У трубопроводах системи гарячого водопостачання за величиною нормованих питомих теплових лінійних потоків знайдені температури води. Зменшення тепловтрат трубопроводів дало змогу знизити циркуляційні витрати води і затрати електроенергії на її перекачування.*

Стан систем гарячого водопостачання (далі – СГВ) змушує шукати резерви для економії теплоти [1–4]. Однак при сьогоdnішньому дефіциті бюджету і стані систем теплопостачання треба впроваджувати ті заходи, які дають найбільшу економію резервів і швидко окупаються.

Тут розглядається вплив ізоляції трубопроводів і циркуляції води в СГВ на величину втрат теплоти і електричної енергії. Наказом Держкоммістобудування України від 29 грудня 1994 р. № 106 до норм [5] внесені зміни, серед яких необхідною умовою є обов’язкова теплова ізоляція трубопроводів СГВ, крім підводок до водорозбірних приладів і сушарок рушників. Теплова ізоляція повинна відповідати вимогам [6] – забезпечувати нормативну величину питомих теплових потоків. Втрати теплоти і вартість СГВ в індивідуальних будинках знайдені у [4], теплові режими централізованих СГВ розглядувалися у [2], однак без урахування вимог до енергозбереження [5, 6].

Для розрахунку тепловтрат трубопроводами СГВ необхідно знати температуру води. В умовах нестационарного конвективного теплообміну температуру води можна знайти з одновимірного рівняння енергії [7]

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w(\tau) \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{4}{Dc\rho} q(\tau), \quad (1)$$

де  $t$  – температура води, °С;  $\tau$  – час, с;  $w(\tau)$  – швидкість води в трубі, м/с;  $x$  – координата колінеарна з віссю труби, м;  $D$  – внутрішня область труби, м<sup>2</sup>;  $c$  – питома теплоємність води, Дж/(кг·°С);  $\rho$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>.

Однак для розв’язання цієї задачі достатньо скористатися рівнянням теплового балансу. На ділянці трубопроводу системи гарячого водопостачання з термічним опором  $R$ , м·°С/Вт, довжиною  $l$  м, витратою води  $G$ , кг/с, температурою води  $t_n$ , °С, на початку ділянки, прокладеною в середовищі з температурою  $t_n$ , °С, виділимо елементарну ділянку завдовжки  $dl$  з падінням температури води  $dt$ . Для елементарної ділянки рівняння теплового балансу буде

$$\frac{t - t_n}{R} dl = - Gcdt, \quad (2)$$