

УДК 624.012:53.09

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
ФУНДАМЕНТІВ КОКСОВИХ БАТАРЕЙ**

Д-р техн. наук С. Л. Фомін, О. М. Кравченко (ХНУБА)

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТОВ КОКСОВЫХ БАТАРЕЙ**

Д-р техн. наук С. Л. Фомин, А. М. Кравченко (ХНУСА)

**NUMERICAL SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF COKE OVEN
BATTERIES FOUNDATIONS**

Dr. Sciences S. Fomin, applicant A. Kravchenko

Запропонована модернізована скінченноелементна рамна модель розрахунку фундаментів коксових батарей з боковим підведенням опалювального газу, що складається з окремих скінченних стержневих елементів СЕ різної висоти для наближення до дійсної плоскої арочної системи. Механізм моделювання на ПК Ліра розглянуто на прикладі розрахунку реконструкції фундаменту коксових батарей Алчевського КХЗ.

Ключові слова: коксові батареї, рамні фундаменти, моделювання напружено-деформованого стану методом скінченних елементів, облік температурних впливів.

Предложена модернизированная конечноэлементная рамная модель расчета фундаментов коксовых батарей с боковым подводом отопительного газа, состоящая из отдельных конечных стержневых элементов КЭ различной высоты для приближения к действительной плоской арочной системе. Механизм моделирования на ПК Лира рассмотрен на примере расчета реконструкции фундамента коксовых батарей Алчевского КХЗ.

Ключевые слова: коксовые батареи, рамные фундаменты, моделирование напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов, учет температурных воздействий.

A modernized framework finite element model is proposed for calculating the foundations of coke oven batteries with gun flue of heating gas, which is composed of finite bar elements CE that have different heights, to approximate a real flat arch system. The mechanism of simulation on PC Lyra is considered using an example of calculating the reconstruction of coke oven batteries foundation at Alchevsk By-Product Coking Plant.

Keywords: coke oven batteries, frame foundations, modeling of stress-strain state using the finite element method, consideration of temperature effects.

Вступ. Коксовою батарею називається група коксових печей, об'єднаних спільним фундаментом, пристроями для підведення опалювальних газів і повітря, відведення продуктів згорання і коксування. Основними конструктивними елементами коксової

батарей є коксові печі, фундамент, борови, димова труба, (робочі) площадки, що обслуговують. Коксова батарея споруджується на залізобетонному фундаменті. У печах з бічним підведенням опалювального газу на нижній плиті фундаменту розташовані канали для

відведення продуктів згоряння – борови і вентиляційний канал в центрі, які об'єднані несучим залізобетонним масивом для сприйняття навантажень від кладки батареї.

За ознакою підведення опалювального газу коксові печі переважної більшості сучасних вітчизняних і зарубіжних конструкцій поділяються на такі групи: печі комбіновані і некомбіновані; печі з бічним підведенням опалювального газу та повітря і печі з нижнім підведенням [1]. Коксові печі з перекидними каналами системи ПК-2К з парними вертикалами з бічним підведенням

газу (рис. 1) мають переваги в порівнянні з печами інших систем: малим опором опалювальної системи; хорошою рівномірністю обігріву коксової камери по висоті і більш високою будівельною міцністю опалювального простінка [2]. Актуальність наукових розробок з проблеми обумовлена необхідністю вдосконалення конструктивних рішень фундаментів коксових батарей з бічним підведенням опалювального газу, як при новому будівництві, так і при реконструкції.

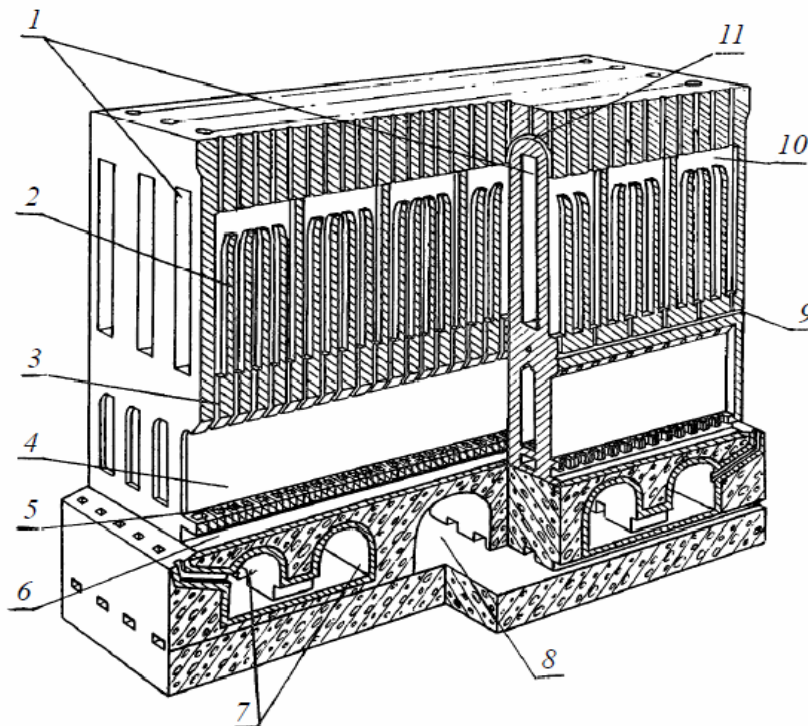


Рис. 1. Коксова піч системи ПК-2К: 1 – камера коксування; 2 – опалювальний простінок; 3 – з'єднувальний канал (косий хід); 4 – регенератор; 5 – решітка; 6 – подовий канал; 7 – борів; 8 – вентиляційний борів; 9 – газопідвідний канал (корнюр); 10 – секція горизонтального каналу; 11 – перекидний канал

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технічні тенденції у перепроєктуванні та будівництві коксових батарей викладені в роботі [3], нелінійна модель введення-виведення для коксової батареї в [4], аналіз перенесення тепла у

фундаментах проведено в [5], розрахунок втрат тепла фундаментної плити при нерівномірних температурних профілях внутрішньої температури в [6].

Дослідження щодо конструкцій фундаментів коксових батарей (КБ) були про-

ведені Харківським ПромбунДІпроектм, НИИЖБ, Гипрококс, керуючись СНиП, і стосувалися в основному фундаментів КБ з нижнім підведенням опалювального газу та повітря. Методика розрахунку фундаментів КБ з бічним підведенням опалювального газу відсутня.

Наразі нормативна база України перейшла на європейські норми. Закінчено процес гармонізації з Єврокодами, розроблені і введені в дію нові національні нормативні документи ДБН і ДСТУ замість СНиП [7-9]. При цьому у Єврокодах не охоплений великий розділ «Бетонних та залізобетонних конструкцій, призначених для роботи в умовах підвищених і високих температур», для якого були розроблені будівельні норми і правила СНиП. У Російській Федерації проведена робота щодо актуалізації нормативної бази в цій галузі, в СП 52-101-2003 з'явилися розділи з деформаційною моделлю, проте багато чого не вистачає для коректного аналізу [10-15].

Визначення мети та задачі дослідження. Метою дослідження є створення методики розрахунку залізобетонних конструкцій фундаментів коксових батарей на новій нормативній базі, гармонізованій з Єврокодами, з використанням напрацювань в частині впливу нагріву на властивості матеріалів і комп'ютерних технологій.

У завдання дослідження входить визначення температурного поля при сталому режимі нагріву, чисельне моделювання зусиль і деформацій фундаментів коксових батарей при розрахунковій стрижневій схемі.

Основна частина дослідження. Методика розрахунку залізобетонних конструкцій фундаментів коксових батарей показана на прикладі проекту реконструкції фундаменту коксових батарей ВАТ "Алчевськкокс" КБ №10 біс. Фундамент коксової батареї з печей ємністю 35,8 м³ з бічним підведенням опалювального газу та повітря подана на рис. 2.

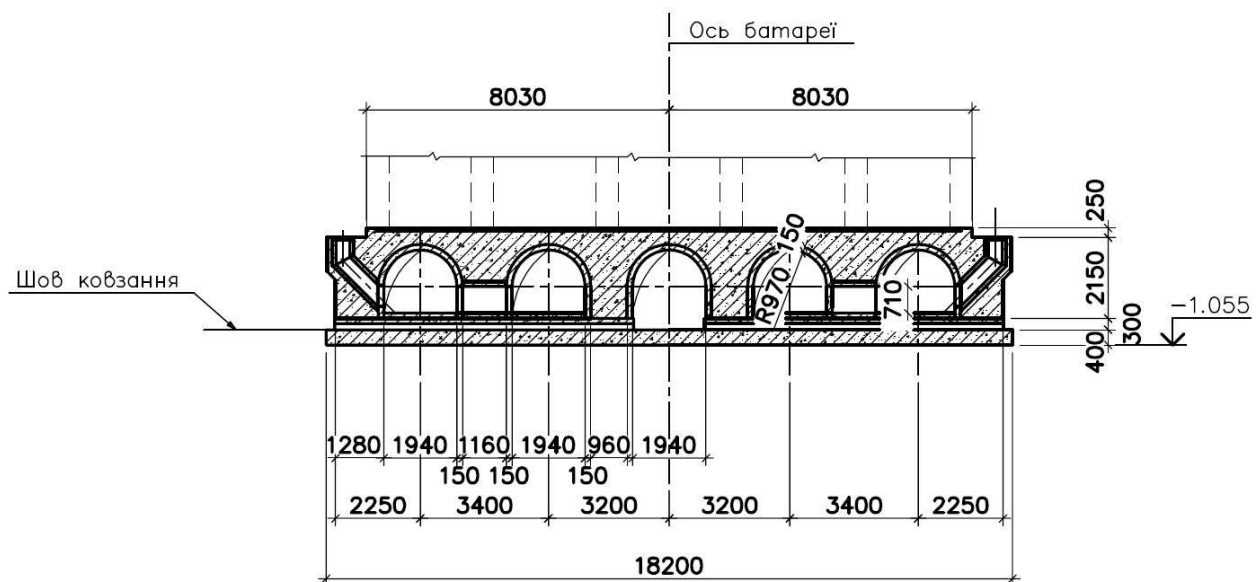


Рис. 2. Поперечний розріз фундаменту коксової батареї №10 біс ВАТ «Алчевськкокс»

При будівництві використовується нижня монолітна плита існуючого фундаменту товщиною 400 мм, шириною 18680 мм і подовжується до проектних

розмірів 84640 мм. Потім виконується вирівнюючий шар бетону товщиною близько 245 мм і шар збірних залізобетонних порожнистих блоків

заввишки 225 мм з кроком 600 мм. На фундаментній плиті споруджується монолітний залізобетонний масив висотою 2700 мм, прорізаний у подовжньому напрямку центральним вентиляційним каналом з арочним склепінням шириною 1940 мм і висотою по центру 2120 мм і чотирма (по два з кожного боку від каналу) боровами для відведення продуктів горіння шириною 2160 мм і висотою 1690 мм. У традиційному варіанті для масиву застосований жаростійкий бетон марки 200, борови футеровані вогнетривкою цеглою.

У процесі розігрівання і експлуатації вогнетривка кладка печей коксових батарей розширюється. Зростання кладки в поперечному напрямку пружно стримується анкерною системою, що складається з металевих анкерних колон, сталевих стяжок і пружин, встановлених з машинного і коксового боків батареї. У подовжньому напрямку для цієї мети передбачені контрфорси.

Для зниження температурних зусиль, що розвиваються в процесі розігріву коксових батарей і при їх охолодженні, між кладкою і фундаментом передбачений шов ковзання. Такий же шов ковзання влаштовується між масивом фундаменту і нижньою фундаментною плитою. Задання температурного впливу при сталому періоді нагріву наведено на рис. 3.

Нижня поверхня фундаменту і відповідно верхня поверхня нижньої фундаментної плити нагріваються менше в результаті системи охолодження, що включає пристрій поперечних каналів між фундаментною плитою і тілом масиву, по яких повітря надходить з тунелів, розміщених за межами фундаменту, в центральний вентиляційний канал, нагрівається, відбирає тепло з нижніх частин фундаменту і віддаляється по витяжних трубах, розташованих у контрфорсах.

Визначення температурного поля при сталому режимі нагріву проведено в роботі [16].

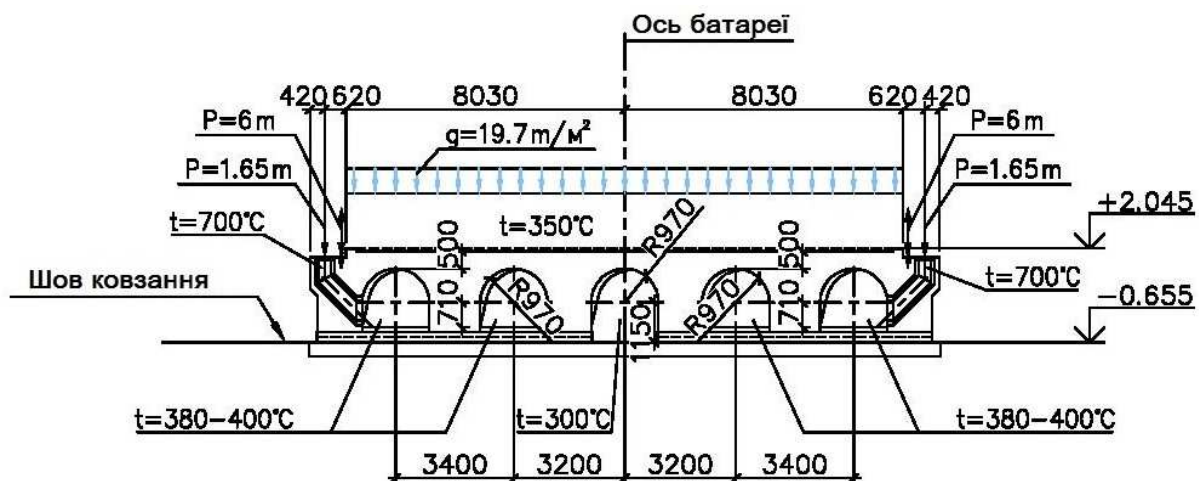


Рис. 3. Схема навантажень на фундамент коксової батареї №10 біс ВАТ «Алчевськкокс»

Чисельне моделювання напружено-деформованого стану фундаменту коксових батарей за розрахунковою стрижневою схемою. Розрахунок фундаментів коксових батарей з бічним

підведенням опалювального газу та повітря в проектній практиці проводиться за стрижневою рамною схемою. Навантаження від ваги кладки, анкерних пристроїв і механізмів прикладаються до

елементів п'ятипрольотної одноповерхової рами відповідно до завдання. Температурний вплив задається в стрижнях рами температурами їх бічних поверхонь. При цьому не враховується нерівномірний розподіл температур по перерізу елементів. В результаті розрахунку виявляються температурні зусилля - згинальні моменти M_u , поздовжні N і поперечні Q сили.

Запропонована модернізована скінченноелементна рамна модель розрахунку фундаментів складається з окремих скінченних стрижневих елементів SE різної висоти для наближення до дійсної плоскої арочної системи.

Для моделювання поперечного перерізу фундаменту коксової батареї №10 біс ВАТ «Алчевськкокс» завтовшки 1000 мм рамною стрижневою схемою поданий ригель складається з окремих стрижневих

елементів різної висоти. Чисельне моделювання проведено за допомогою ПК ЛІРА. Арочні частини в світлі між колонами 1940 мм складені з п'яти елементів однакової довжини – 388 мм і різної висоти: 840,600,500,600,840 мм, рівновеликих площам заміненних арок. Частини ригеля над колонами визначені висотою $500 + 970 = 1470$ мм і шириною колон: для крайніх ($CE42, CE47$) рівною 1360 мм, для ($CE43, CE46$) рівною 1600 мм і для середніх ($CE44, CE45$) - 1260 мм.

Вісь ригеля прийнята на відстані 250 мм від верху фундаменту, осі колон – по середині їх ширини, висота колон до центральної осі ригеля – 2450 мм. За цими даними і характеристиками бетону ($E_c = 25000$ МПа, $R_0 = 0.025$ МН/м³) розраховані жорсткості елементів рами (рис. 4).

Список типів жорсткості

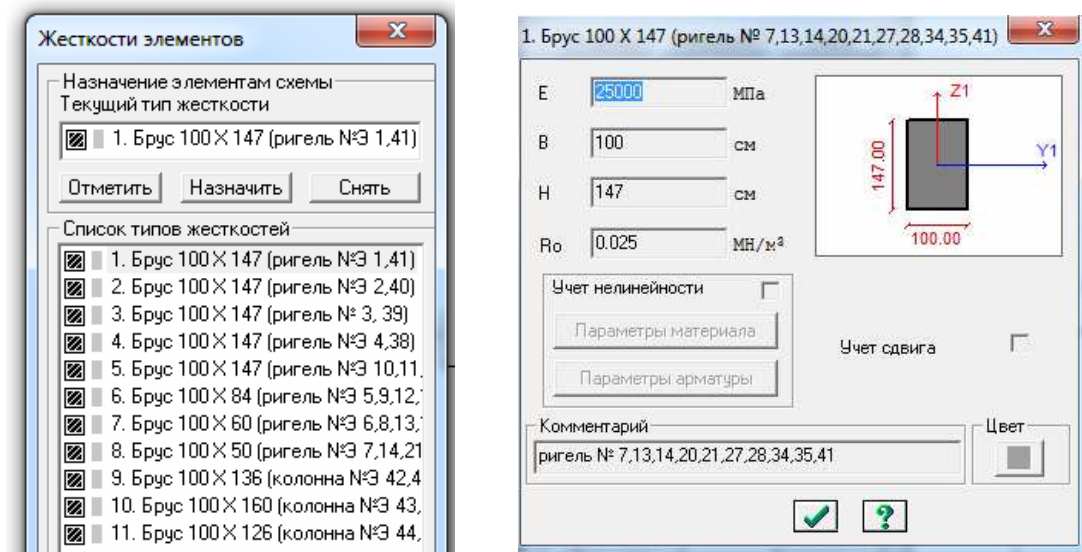


Рис. 4. Список типів жорсткості елементів рами

На рис. 5 показана розрахункова схема рами з номерами вузлів з'єднання SE , на рис. 6 – з номерами SE .

При складанні елементів врахована особливість з'єднання стрижневих і плоских скінченних елементів [17].

Особливість полягає в тому, що якщо по вузлах плити встановити ригелі, то отримаємо варіант збігу серединної поверхні плити і центру тяжіння стрижня ригеля. Цей нескоригований варіант демонструється на рис. 7.

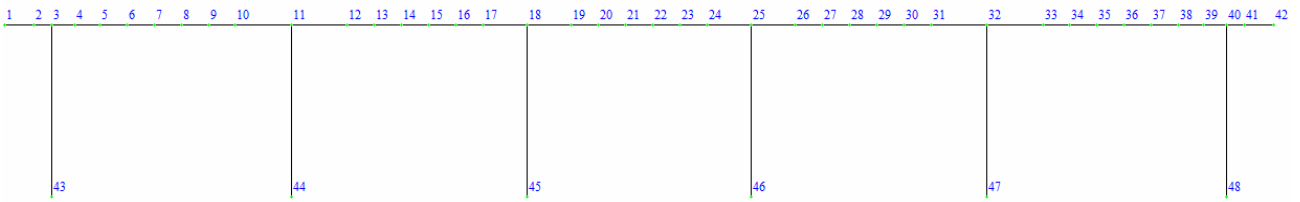


Рис. 5. Номери вузлів з'єднання скінченних елементів

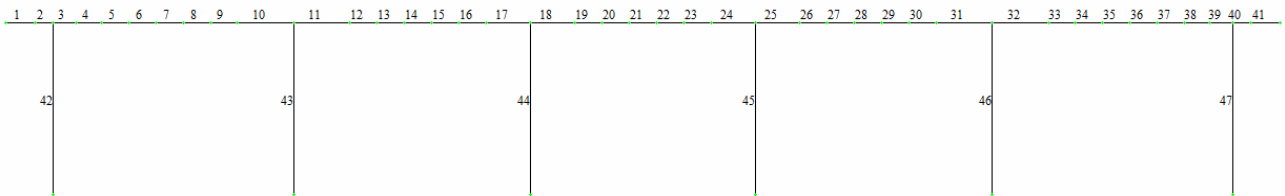


Рис. 6. Номери скінченних елементів

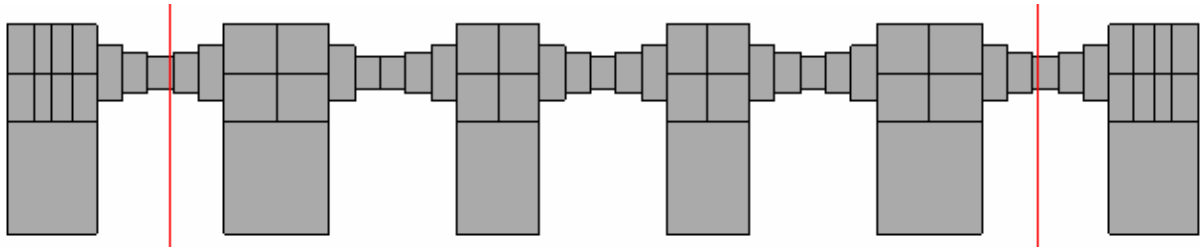


Рис. 7. Нескоригована просторова модель (3D-графіка)

Для усунення цієї помилки можна скористатися, наприклад, введенням абсолютно жорстких вставок. Скоригована

розрахункова схема подана на рис. 8, на рис. 9 дається її перспектива.

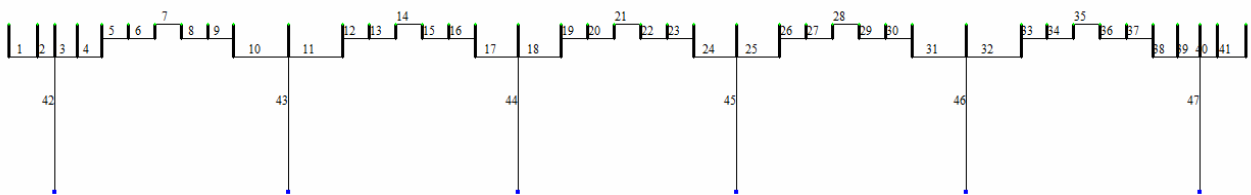


Рис. 8. Скоригована СЕ-модель жорсткими вставками

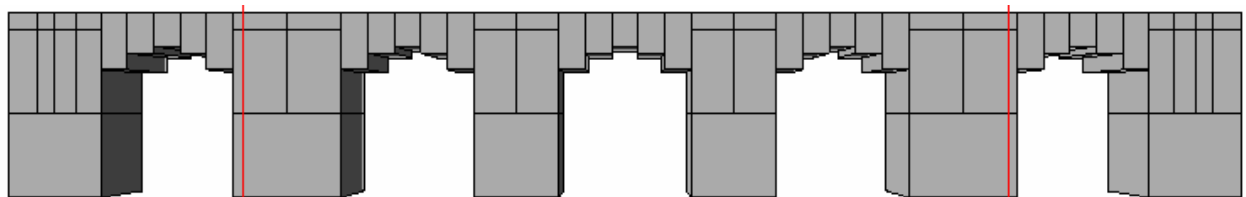


Рис. 9. Скоригована модель (перспектива-картографічне зображення)

Задання зв'язків. У всіх нижніх вузлах колон накладена заборона на переміщення по осі Z (вузли 43 - 48), а в нижньому третьому зліва вузлі колони 44 – додаткова заборона по осі X і поворотів UX і UZ.

Навантаження:

1 навантаження – власна вага фундаменту, яка підраховується для кожного елемента і задається у вигляді рівномірно розподілених сил уздовж глобальної осі Z;

2 навантаження – зосереджені сили P1 = 1,65 т у вузлах № 2,41; P2 = 6 т у вузлах №4,39 і розрахункове навантаження від ваги кладки і обладнання у вигляді рівномірно розподілених сил уздовж глобальної осі Z для ригеля q = 19,7 Тс / м;

3 навантаження – температурне, яке задається температурним перепадом

уздовж місцевої осі Z1. Для ригеля у першому, другому, четвертому і п'ятому прольотах T1 = 350 °С, T2 = 400 °С, для третього прольоту T1 = 350 °С, T2 = 300 °С. Для колон: №42 – T1 = 400 °С, T2 = 20 °С; №43 – T1 = 400 °С, T2 = 400 °С; №44 – T1 = 300°С, T2 = 400°С; №45 – T1 = 400 °С, T2 = 300 °С; №46 -T1 = 400 °С, T2 = 400 °С; №47 -T1 = 20 °С, T2 = 400 °С.

Коефіцієнт температурного розширення для бетону прийнятий $\alpha=10 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Результати розрахунку. На рис. 10-18 подано епюри поздовжніх сил N, поперечних сил Q і згинальних моментів M при навантаженні власною вагою (1-ше навантаження), навантаженні зосередженими силами і вагою кладки батареї (2-ге навантаження) і температурними впливами (3-тє навантаження).

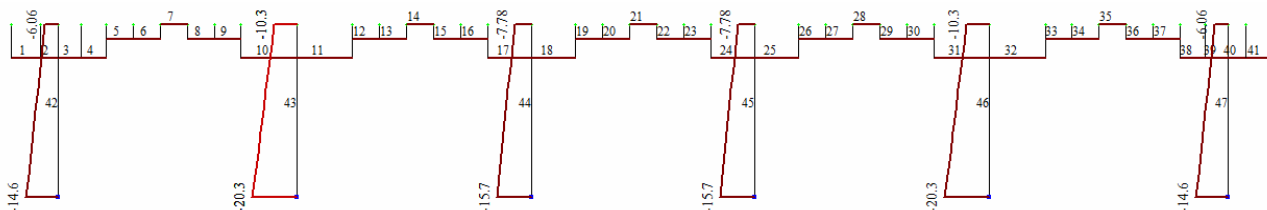


Рис. 10. Епюри поздовжніх сил N, т, при навантаженні власною вагою (мінімальне зусилля -20,3167 т)

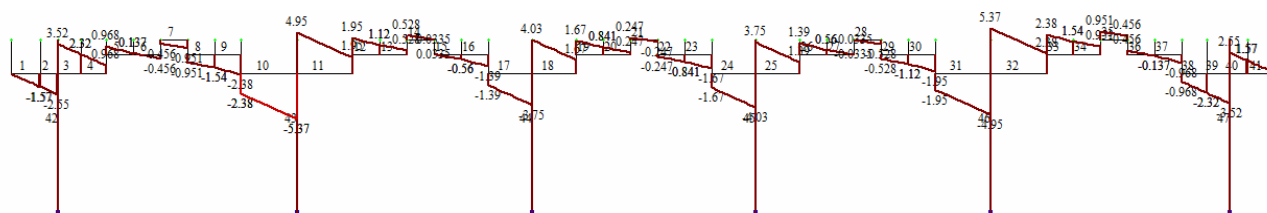


Рис. 11. Епюри поперечних сил Q, т, при навантаженні власною вагою (мінімальне зусилля -5,37304 т, максимальне зусилля 5,37304 т)

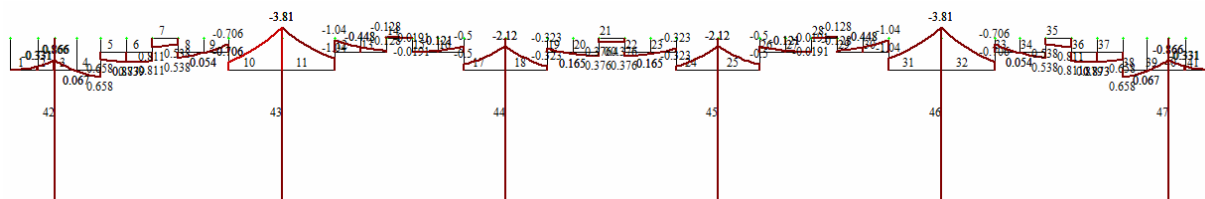


Рис. 12. Епюри згинальних моментів M, тм, при навантаженні власною вагою (мінімальне зусилля -3,80561 тм, максимальне зусилля 0,878929 тм)

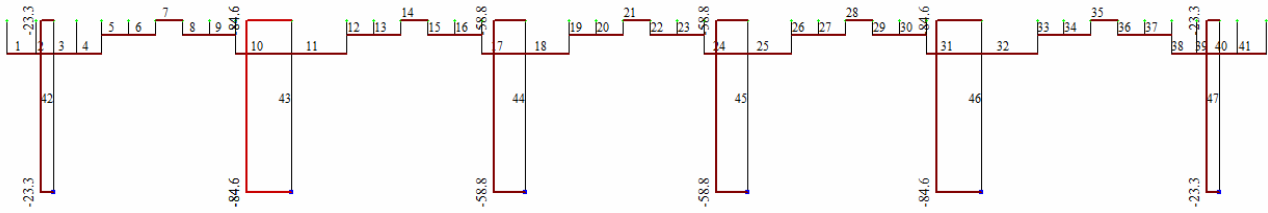


Рис. 13. Епюри поздовжніх сил N , т, при навантаженні зосередженими силами і вагою кладки батареї (мінімальне зусилля -84,5655 т)

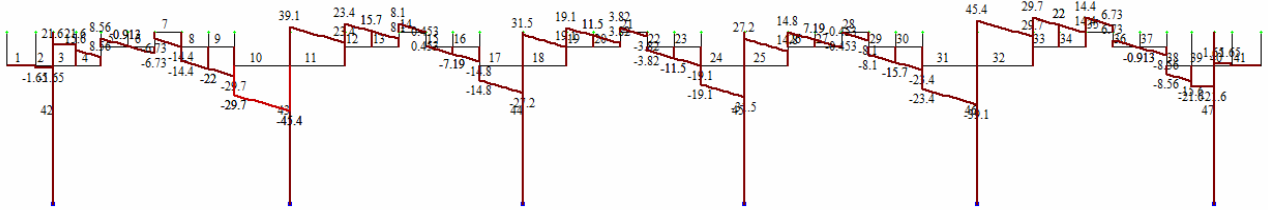


Рис. 14. Епюри поперечних сил Q , т, при навантаженні зосередженими силами і вагою кладки батареї (мінімальне зусилля -45,4215 т, максимальне зусилля 45,4215 т)

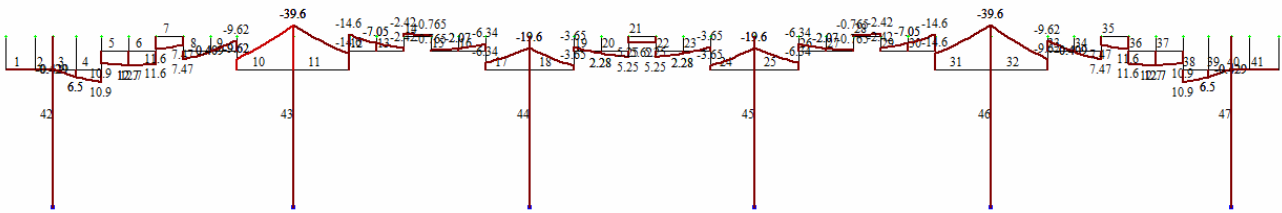


Рис. 15. Епюри згинальних моментів M , тм, при навантаженні зосередженими силами і вагою кладки батареї (мінімальне зусилля -39,6496 тм, максимальне зусилля 12,7136 тм)

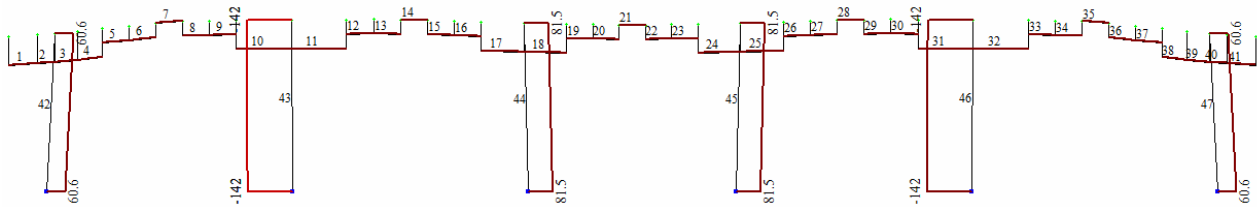


Рис. 16. Епюри поздовжніх сил N , т, при температурному впливі (мінімальне зусилля -142,068 т, максимальне зусилля 81,5139 т)

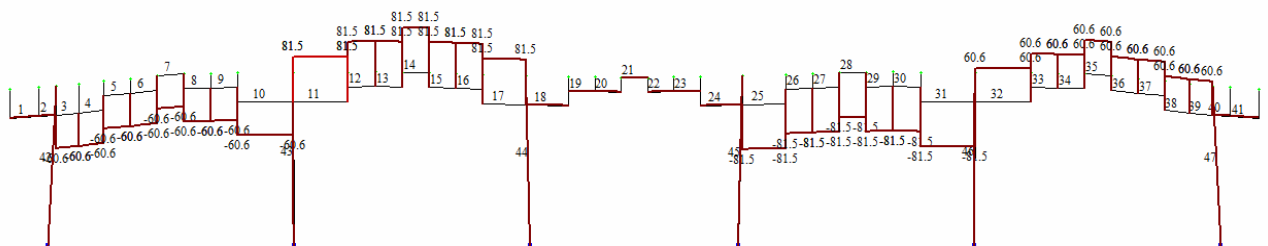


Рис. 17. Епюри поперечних сил Q , т, при температурному впливі (мінімальне зусилля -81,5139 т, максимальне зусилля 81,5139 т)

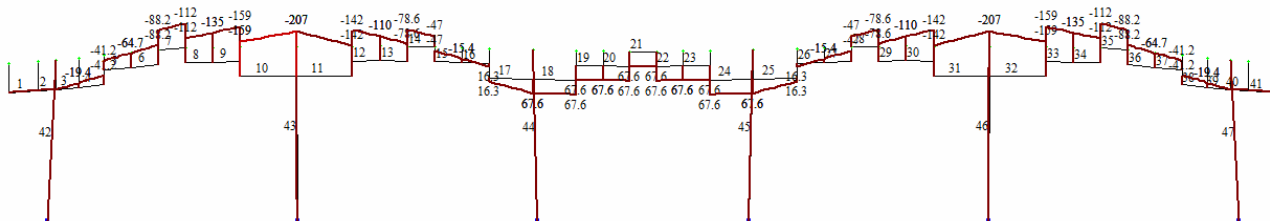


Рис. 18. Епюри згинальних моментів M , тм, при температурному впливі (мінімальне зусилля $-207,095$ тм, максимальне зусилля $67,6068$ тм)

Підбір арматури

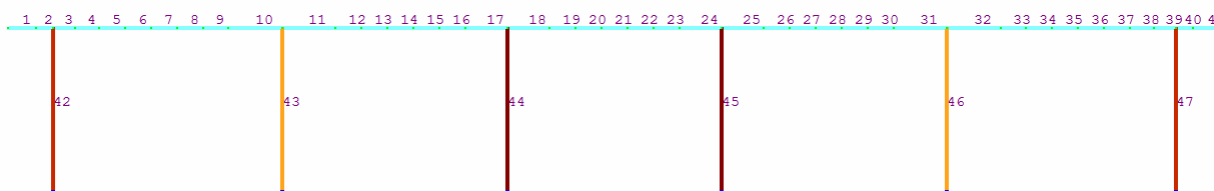
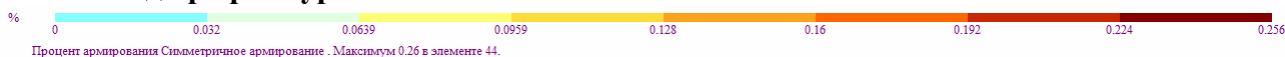


Рис. 19. Відсоток армування в колонах (максимум 0,26 % в колоні 44)

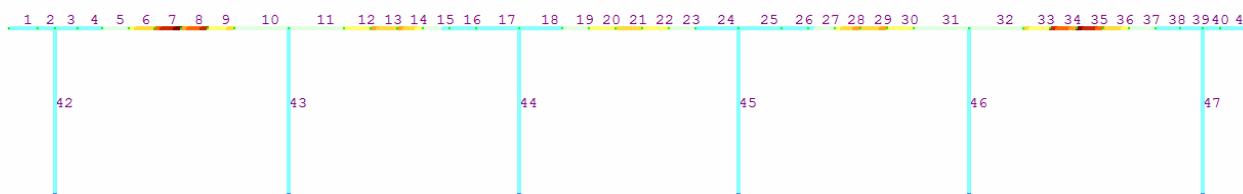
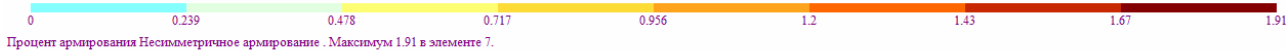


Рис. 20. Відсоток армування в елементах ригеля (максимум 1,91 % в елементі 7)

Арматуру в балці 7 і в колоні 44 див. в таблиці.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку:

1. Запропонована модернізована скінченноелементна рамна модель розрахунку фундаментів коксових батарей з боковим підведенням опалювального газу, що складається з окремих скінченних стрижневих елементів СЕ різної висоти,

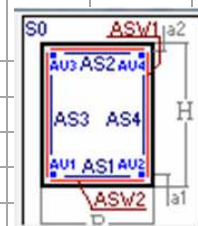
показала свою ефективність у порівнянні з традиційною рамною системою.

Нова розрахункова модель збільшила надійність конструкції фундаменту за рахунок наближення до дійсної плоскої арочної системи, не суттєво ускладнивши трудомісткість розрахунку.

2. Подальший розвиток запропонованого підходу може мати місце при розрахунках різних конструкцій, елементи яких мають різні розміри та конфігурації за їх довжиною.

Таблиця

Пере-різ	Симет-рія	Поздовжня арматура, см ²									Поперечна, см ²		Ширина тріщин, мм	
		AU1	AU2	AU3	AU4	AS1	AS2	AS3	AS4	%	ASW1	ASW2	скорочено	тривало
Балка 7; Прямокутник; В=100.00; Н=50.00 см; L=0.39 м														
Бетон В20; Арматура: поздовжня А-III; поперечна А-I														
1	Н	4.5	4.5	12.57	12.57		37			1.42	14.6		0.28	0.28
		3.5	3.5	12.57	12.57		37			1.38				
2	Н	3.75	3.75	12.57	12.57		50.5			1.66	14.6		0.29	0.29
		3	3	12.57	12.57		50.5			1.63				
3	Н	6.25	6.25	12.57	12.57		58			1.91	14.6		0.14	0.14
		6.25	6.25	12.57	12.57		58			1.91				
Колона 44; Прямокутник; В=100.00; Н=126.00 см; L=2.45, LY=1.72, LZ=1.72 м														
Бетон В20; Арматура: поздовжня А-III; поперечна А-I														
1	С	5.79	5.79	5.79	5.79	2.26	2.26	2.26	2.26	0.26			0.29	0.29
		3.27	3.27	3.27	3.27	2.26	2.26	2.26	2.26	0.18				
2	С	5.79	5.79	5.79	5.79	2.26	2.26	2.26	2.26	0.26			0.29	0.29
		3.27	3.27	3.27	3.27	2.26	2.26	2.26	2.26	0.18				
3	С	5.79	5.79	5.79	5.79	2.26	2.26	2.26	2.26	0.26			0.29	0.29
		3.27	3.27	3.27	3.27	2.26	2.26	2.26	2.26	0.18				



Список використаних джерел

1. Кауфман, А. А. Отечественные и зарубежные коксовые печи: конструкции и оборудование [Текст]: учеб. пособие / А. А. Кауфман, Ю. Я. Филоненко; Министерство образования и науки Российской Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 88 с.
2. Кауфман, А. А. Технология коксохимического производства: учеб. пособие для вузов [Текст] / А. А. Кауфман, Г. Д. Харлампович. – Екатеринбург: ВУХИН-НКА, 2005. – 288 с.
3. 98/03564 Technical trends in the redesign and construction of coke oven batteries and units for dry quenching of coke. Fuel and Energy Abstracts. – September 1998. – Volume 39, Issue 5. – Page 336.
4. Input-output nonlinear model of a coke oven battery. Control Applications of Nonlinear Programming and Optimization / C. Bénard, S. Berekdar, C. Duhamel, M.-M. Rosset. – 1989, 1990. – Pages 95-99.
5. CFD analysis of the thermal behaviour of heating walls in a coke oven battery. International Journal of Thermal Sciences / Jacek Smolka, Lukasz Slupik, Adam Fic, Andrzej J. Nowak, Ludwik Kosyrzyk. – June 2015. – Volume 104. – Pages 186-193.
6. Slab heat loss calculation with non-uniform inside air temperature profiles. Energy Conversion and Management / Sangho Choi, Moncef Krarti. – September 1996. – Volume 37, Issue 9. – Pages 1435-1444.
7. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. – 71 с.
8. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.

9. ДСТУ-Н-П Б В.2.6-XX:20XX. Проектування залізобетонних конструкцій. Ч. 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. (EN 1992-1-2:2004, MOD).

10. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры [Текст]. – М., 2004.

11. СНиП 2.03.04-84. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях повышенных и высоких температур [Текст]. – М., 1985.

12. СП 52-110-2009. Бетонные и железобетонные конструкции, подвергающиеся технологическим повышенным и высоким температурам [Текст] / ФГУП «НИЦ «Строительство». – М., 2009. – 166 с.

13. СП 27.13330.2011. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. Актуализированная редакция СНиП 2.03.04-84 [Текст]. – М., 2011. – 115 с.

14. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций [Текст]. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2006. – 81 с.

15. СП 52-00-2011. Бетонные и железобетонные конструкции, подвергающиеся технологическим температурным воздействиям. Актуализированная редакция СНиП 2.03.04-84 [Текст]. – М., 2011.

16. Фомин, С. Л., Температурные поля в конструкциях фундаментов коксовых батарей [Текст] / С. Л. Фомин, А. М. Кравченко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 73. – С. 436-444.

17. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона (проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии) [Текст] / А. С. Городецкий, Л. Г. Батрак, Л. В. Лазнюк и др. – К.: Изд-во «Факт», 2004. – 106 с.

Фомін Станіслав Леонідович, д-р техн. наук, професор кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-01-63. E-mail: Sfomin@ukr.net.

Кравченко Олександр Михайлович, здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Заступник директора ДП «ГИПРОКОКС» Тел.: (057) 719-22-96. +380675465343. E-mail: kravchenko@giprokoks.com.

Fomin Stanislav Leonidovich, Doctor of Sciences, professor of chair of concrete and masonry structures at Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (057) 700-01-63. E-mail: Sfomin@ukr.net.

Kravchenko Alexander Michailovich, applicant for scientific degree of candidate of technical sciences at chair of concrete and masonry structures in Kharkiv National University of Construction and Architecture. Deputy Director of SE "GIPROKOKS". Tel.: (057) 719-22-96. E-mail: kravchenko@giprokoks.com.

Стаття прийнята 18.05.2016 р.