

В.С. Шмуклер, О.І. Лугченко, А.Х. Нажем

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕТИНУ СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ШЛЯХОМ ТОПОЛОГІЧНОЇ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ

В роботі одержані аналітичний та чисельний розв'язки задачі прямого проектування стиснутих елементів, результат якої отриманий у вигляді геометричного «образу» конструкцій. Тут, у відмінності від традиційного перевірного підходу, постулюється варіант постановки і розв'язку задачі топологічної раціоналізації. Відмінність використовуваної процедури полягає в прийнятті нових критеріїв раціоналізації, що носять енергетичний характер.

Ключові слова: деформація, енергія, ітерація, порожноутворювачі, порожнина, раціоналізація.

Постановка проблеми

Розглядається формування структури вертикальних залізобетонних конструкцій системи «Монофант» [1,2]. До них ставляться колони і пілони (пласкі діафрагми й стіни ядер жорсткості). Постановка задачі припускає встановлення розрахунковим шляхом внутрішньої геометрії позначених конструктивів у вигляді порожнистих енергетично рівномірних елементів. Зовнішня геометрія їх ухвалюється простою, традиційною, що забезпечує використання модульної системи й стандартних розв'язків вузлів сполучення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розробка архітектурно-конструктивних систем, а також методів їх проектування й зведення була й залишається актуальною проблемою для будівельної галузі. При цьому, зовсім очевидно, що сучасний стан речей вимагає створення й експлуатації нових підходів, в першу чергу, спрямованих на гармонізацію людини із природою.

Сказане, повною мірою, ставиться як до принципів пошуку структури споруд, так і до способів їх зведення. Проектуючи конструкції будинків і інженерних споруд, вибираючи одночасно технології виробництва їх елементів і способів будівництва, слід відмовитися від біонегативних конструктивів, задовольняючи правилам створення як мінімум, біонейтральних, а краще – біопозитивних систем.

Перерахованим вимогам належною мірою задовольняє існуюча архітектурно-будівельна система «МОНОФАНТ» [1,2]. Вона являє собою каркас, який містить фундамент, колони, елементи жорсткості, перекриття й покриття. Усі перераховані елементи виконані з монолітного залізобетону з порожнистими перетинами, що

утворені за рахунок розміщення всередині них вкладишів - порожноутворювачів. Наслідком цієї обставини є виняткове зниження власної ваги конструктиву [3]. При монолітному будівництві з'являється можливість надання порожнинам певної конфігурації й розмірів. Відомі конструктивні системи, такі, наприклад, як Airdeck (США), Bubbledeck (США), Cobiax (ФРН), U-Boot Beton (ФРН) і інші також вирішують саме це завдання [4,5,6]. Але ці технології використовують для вкладишів стандартні рішення із застосуванням вторинної пластмаси. У зв'язку із цим, конструкції мають істотні недоліки (у першу чергу високу ціну та відсутність різноманітності форм та розмірів вкладишів - порожноутворювачів), що не дозволяє широко використовувати їх у будівельній галузі.

Теоретичною основою при прямому (раціональному) проектуванні конструкцій у машинобудуванні є створені нові Simp-Метод (Solid Isotropic Materials with Penalization) і Beso-Метод (Bidirectional Evolutionary Structural Optimization) [7,8]. Ці методи, у тому числі, фундують відомий програмний комплекс ABAQUS [7,8,9].

Однак, істотний додатковий ефект може бути отриманий у випадку надання вкладишам обґрунтованої (розрахованої) просторової конфігурації, що визначає раціональну роботу (опір) конструкції. Тому доцільно дослідити питання отримання конструктивної форми перетинів її елементів розрахунковим, а не інтуїтивним шляхом.

Для реалізації зазначеної задачі застосовується модифікація методу топологічної раціоналізації [1].

Формулювання мети та завдання дослідження

Метою роботи є одержання аналітичного й чисельного розв'язків задачі прямого проектування стиснутих елементів, результат яких отримуємо у вигляді геометричного «образу» конструкцій. Відмінність використовуваної процедури від згаданих вище полягає в прийнятті нових критеріїв раціоналізації, що носять енергетичний характер. Крім того, ставитися завдання надання конструкції вигляду порожнистого елемента.

Основна частина дослідження

У роботі прийняті наступні гіпотези і припущення:

1. Задача розглядається як плоска, проте, тут переслідується винятково мета показу алгоритму розв'язку, а облік (при необхідності) просторового випадку аналогічний наведеному.

2. Елементи, що розраховуються, виконані з однорідного матеріалу (у цьому випадку залізобетону). Облік неоднорідності впливає тільки на обсяг обчислень.

3. Діаграми деформування матеріалу для розтягу, стиску і зсуву вважаються відомими. При необхідності, вони приймаються на підставі відповідних експериментів.

4. Внесок енергії дотичних напружень у загальний баланс вважається малим у порівнянні із внеском нормальних напружень.

Припустимо, що зовнішній вигляд конструкції являє собою паралелепіпед з габаритами $b_{\max} \times h_{\max} \times H$ (рис.1). Наведені параметри, як правило, призначаються на підставі об'ємно-планувального рішення і типорозмірів щитів використовуваної опалубки. Далі, перетин розбивається на «N» прямокутників (скінцевих елементів) з розмірами $b_i \times h_i$, при цьому, послідовно для кожного рівня

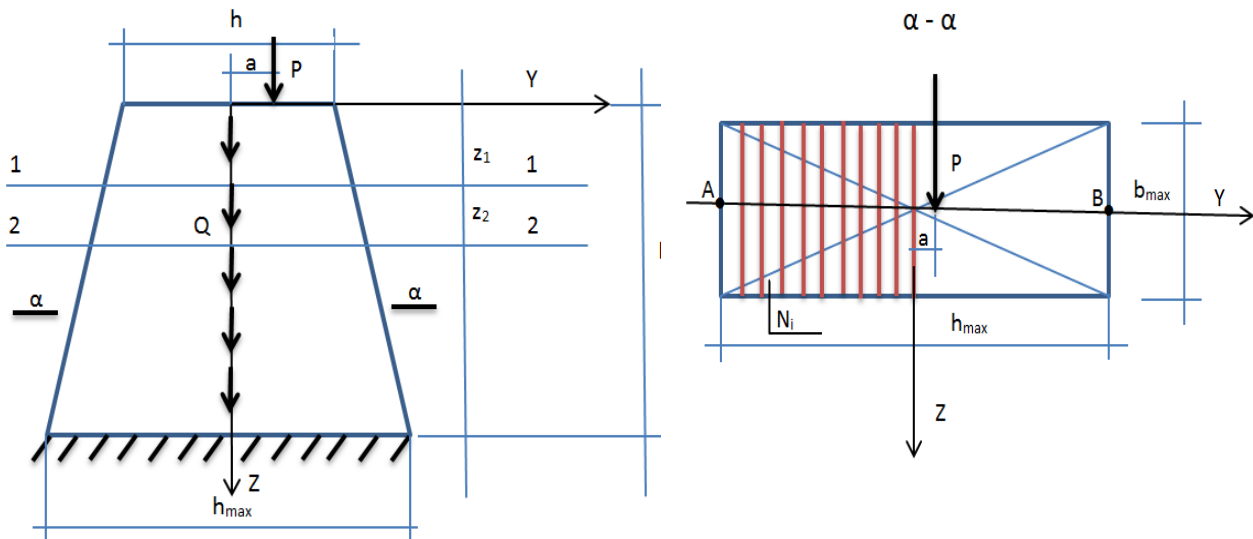


Рис. 1. Розрахункова модель елемента: b_{\max}, h_{\max} - розміри поперечного перетину; H - висота елемента; P - поздовжнє зосереджене навантаження на елемент; Q - власна вага конструкції; $z_{1,2}$ - аплікати претинів; $a \geq 0$ - ексцентриситет; A, B - точки перетину з екстремальними напруженнями, при цьому $\sigma_A \geq 0$ та $\sigma_B \geq 0$; N_i - кількість скінцевих елементів.

$$z_i = \frac{H_i}{K}, \quad (1)$$

де z_i - апліката перетину [10,11];
 K - кількість перерізів по висоті елемента.

При цьому $z \in (0; H)$, $y \in \left(-\frac{h}{2}; +\frac{h}{2}\right)$, а

координата «у» відлічується від центру ваги перетину.

$$I = \beta \cdot A, \quad (2)$$

де I - момент інерції перетину щодо вісі «х»;
 A - площа перетину;

$$\beta = \beta(h), \text{ для прямокутного перетину } \beta = \frac{h^2}{12}.$$

Адаптуючи приватні рішення для розглянутого випадку, запишемо [12,13,14]:

$$A(y; z) = P \left(1 \pm \frac{12 \cdot a \cdot y}{h^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{1}{2Ee_n}} \exp^{+\frac{\gamma}{f_{cd}} z}, \quad (3)$$

(1)
 де P - поздовжня сила;

γ - питома вага матеріалу конструкції;
 f_{cd} - розрахункова межа міцності бетону на стиск;
 a - ексцентриситет поздовжньої сили;
 E - січний модуль деформацій першого роду;
 $e_n = \gamma_c \cdot e_u$ - нормоване значення щільності потенційної енергії деформацій (ЩПЕД);
 $\gamma_c \in (0;1)$ - статистично обґрунтований коефіцієнт, для залізобетону $\gamma_c = 0,707$;

Граничне значення ЩПЕД визначається за критерієм [2,12]:

$$e_u = 0,5 \chi_\varepsilon^2 [(\chi_\varepsilon + 1)e_{uc} + (\chi_\varepsilon - 1)e_{ut}] + (1 - \chi_\varepsilon^2)e_{ush}, \quad (4)$$

де $\chi_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$, $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$ - параметр

Лоде - Надаї деформованого стану [15];
 $e_{uc}; e_{ut}; e_{ush}$ - парціальні ЩПЕД для деформацій стиску, розтягу й зсуву.

Визначивши по (3) геометрію й обсяг енергетично рівномірного східчастого елемента, визначаємо структуру еквівалентного порожнистого конструктиву. Його обсяг буде рівним:

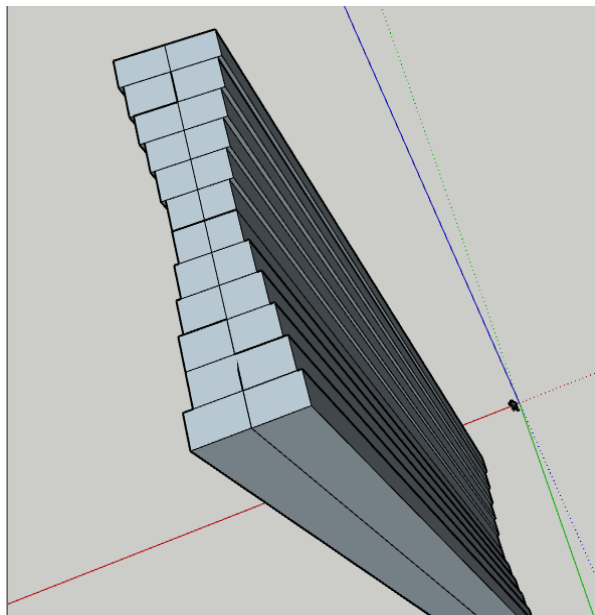
$$V_e = b_{\max} \cdot h_{\max} \cdot H - \sum_{j=1}^{K+1} \sum_{i=1}^{N+1} b_i \cdot h_i \cdot H_j, \quad (5)$$

де $b_i \cdot h_i \cdot H_j$ - обсяг скінцевого елемента.

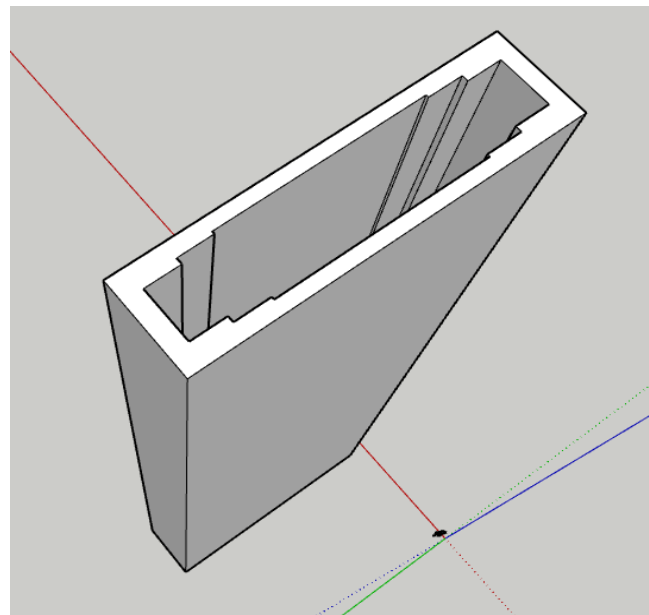
Конфігурація порожнини будується пошарово для кожного z_i з наступним з'єднанням відповідних точок криволінійними поверхнями. Розрахунки виконуються по алгоритму, що використовує процедуру (3).

Для чисельного аналізу розглянутий статично визначений пілон (рис.1). Висота пілона $H = 4$ м. Стартовий переріз $b \times h$ визначається з використанням традиційного методу зворотнього проектування для кожного окремого випадку завантаження. При цьому, $h = const$, а ширина $b(x)$ - підлягає визначенню в ході розв'язку задачі з умови енергетичної рівномірності. Для проектування прийнятий бетон класу С16/20 ($f_{cd} = 11,5$ МПа; $f_{ctd} = 0,87$ МПа). Крок розбивки перерізу пілону по довжині рівний 0,05м. Розглядаються три окремі випадки завантаження.

Завантаження №1. Прийнято зосереджене навантаження $P = 1000$ кН прикладене в центрі ваги пілона. Розрахунок за алгоритмом наведено графічно (рис. 2).



а.



б.

Рис. 2 а,б. Завантаження №1. Перетин пілону, визначений з умови енергетичної рівномірності (а) та внутрішня структура перетину пілону з простою зовнішньою й складною внутрішньою геометрією (б).

Завантаження №2. Прийнята зосереджена сила $P = 1000$ кН прикладена з ексцентриситетом $a = 0,1$ м (випадок малих ексцентриситетів). Розрахунок за

алгоритмом наведений графічно й презентований на рис. 3.

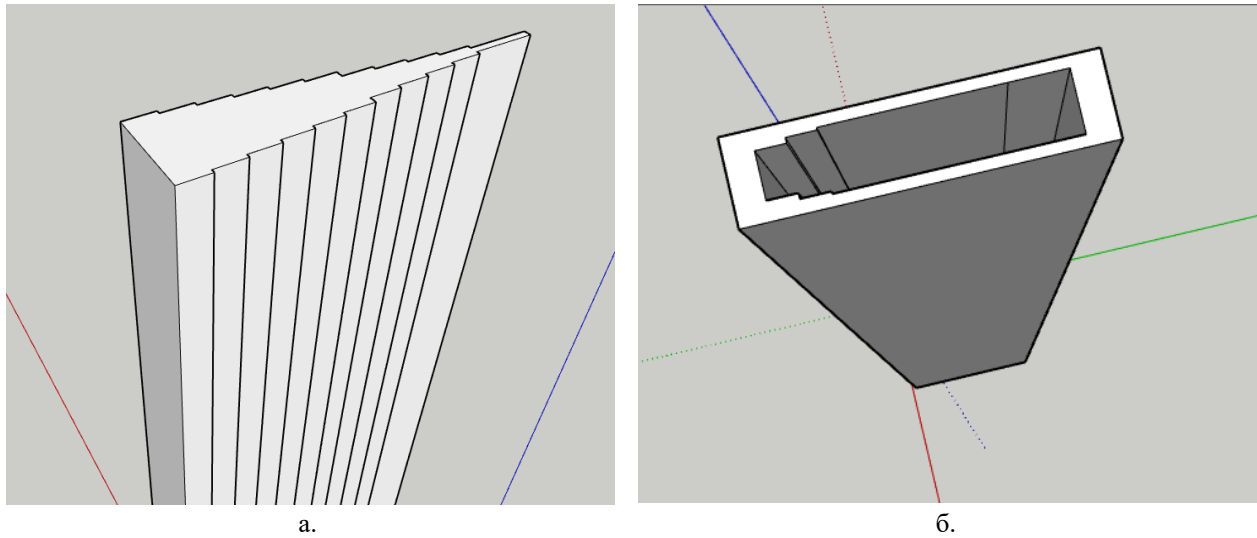


Рис. 3 а,б. Завантаження №2. Перетин пілону, визначений з умови енергетичної рівномірності (а) та внутрішня структура перетину пілону з простою зовнішньою й складною внутрішньою геометрією (б).

Завантаження №3. Прийнята зосереджена сила $P = 1000$ кН прикладена з ексцентриситетом $a = 0.15$ м (випадок великих ексцентриситетів, тобто $\sigma_A < 0$ (розтяг)). При цьому, вважається, що напруження розтягу сприймаються арматурою. Задача стає 2-х модульною. Розв'язок її доцільно будувати методом редукційних коефіцієнтів, приводячи перетин до бетонного, тобто [13,16]:

$$A_{ic} = \frac{E_s}{E_c} A_{is}, \quad (6)$$

де A_{is} - площа поперечного перетину елементарного паралелепіпеду зі сталі;
 A_{ic} - площа поперечного перетину елементарного паралелепіпеду з бетону;

$$\varphi = \frac{E_{is}}{E_{ic}} - \text{редукційний коефіцієнт};$$

$E_{is}; E_{ic}$ - січні модулі деформацій першого роду сталі і бетону відповідно (рис. 4)

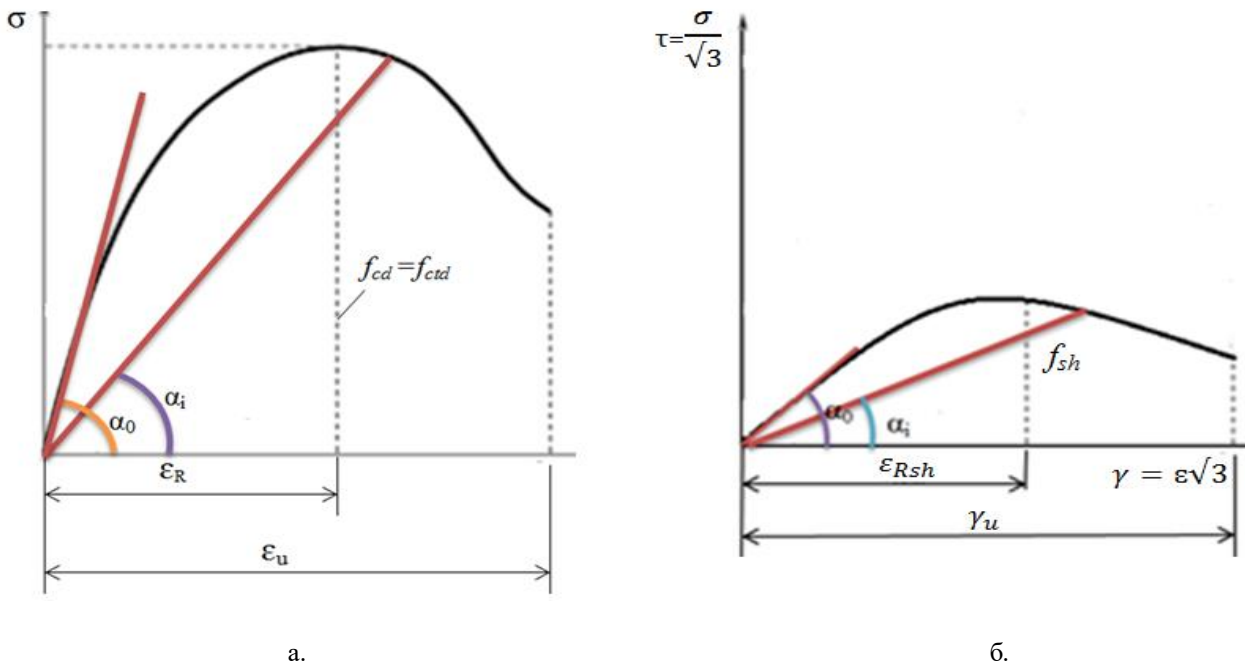


Рис. 4. Діаграми матеріалу: а – задана; б – трансформована [17]: σ, τ – нормальні й дотичні напруження; ϵ, γ – лінійна й кутова деформації; f_{cd}, f_{ctd}, f_{sh} – межі міцності матеріалу;

$$E_0 = tg\alpha_0; E_c = tg\alpha_i - \text{січні модулі.}$$

Зусилля розтягу в перетині, які виникають завдяки знакозменній епюрі згинаючих моментів, сприймаються сталеву арматурою.

Розрахунок колони за алгоритмом наведено графічно (рис. 5).

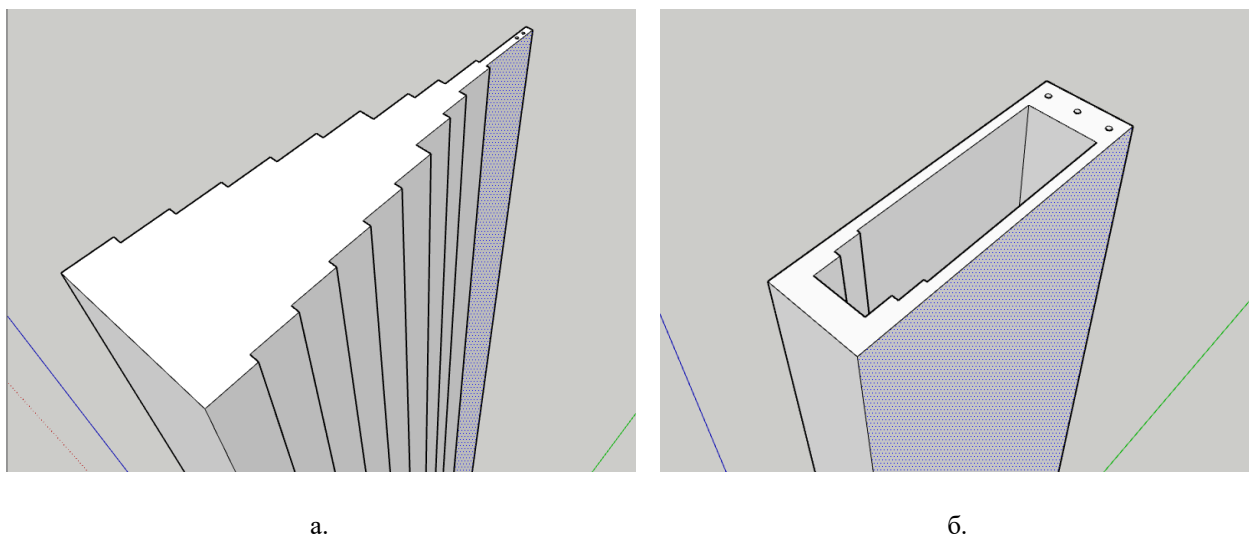


Рис.5 а,б. Завантаження №3. Перетин пілону, визначений з умови енергетичної рівномірності (а) та внутрішня структура перетину пілону з простою зовнішньою й складною внутрішньою геометрією (б).

Структуру еквівалентного рівномірному порожнистому конструктиву формуємо дотримуючись конструктивно-технологічних вимог щодо проектування залізобетонних конструкцій,

тобто, товщину стінок коробчатого перетину приймаємо не меншою ніж 50 мм. Але ж, незважаючи на це, отримуємо суттєву економію матеріалу (табл.1,2).

Таблиця 1

Площа перерізу конструктива при різних способах завантаження

Переріз	Площа перерізу конструктива, см ²		
	Завантаження №1	Завантаження №2	Завантаження №3
Суцільний	1740	1740	2190
Східчастий енергетично рівномірний	1374	941	928
Порожній (коробчатий)	756	723	815

Таблиця 2

Витрати матеріалу на конструктив при різних формах перетину

Переріз	Обсяг матеріалу конструктива, м ³		
	Завантаження №1	Завантаження №2	Завантаження №3
Суцільний	0.696	0.696	0.876
Східчастий енергетично рівномірний	0.549 21%	0.376 46%	0.371 58%
Порожній (коробчатий)	0.303 56%	0.29 58%	0.326 62%

Дані наведені в таблицях констатують значну економію матеріалу (21% - 58%) залежно від завантаження при проектуванні конструкції як енергетично рівномірного елемента. У свою чергу,

перехід до порожнистого перетину, дає додаткову економію матеріалу (56% - 62%) за рахунок розвитку висоти.

Висновки

Новий прогресивний напрямок, названий топологічною (біонічною) раціоналізацією, забезпечує формування конструктивних систем з наперед заданими позитивними властивостями. Крім того, слід зазначити, що отримане рішення є фізично прозорим, а його конструктивне відображення – результат розрахунку, а не інтуїтивного підбору. Останнє висловлювання констатує факт переводу проблеми проектування конструкцій на новий рівень якості.

Література

1. *Rational Design of Structural Building Systems*, (2019), V. Babaev, I. Ievzerov, S. Evel, A. Lantoukh-Liashchenko, V. Shevetovsky, O. Shimanovskiy, V. Shmukler, M. Sukhonos / DOM publishers, Berlin / Germany, 384 p., ISBN 978-3-86922-733-7, www.dom-publishers.com
2. Шмуклер В.С. Чисельна верифікація одного підходу біонічної раціоналізації конструкцій / О.І. Лугченко, Алі Назем // 36. наук. пр.- Українського державного університету залізничного транспорту. - Харків, 2020. - Вип. 189.- С. 36-52.
3. Шэнли Ф.Р. Анализ ваги й міцності літакових конструкцій: Ф.Р. Шэнли.- Москва: Оборонгиз, 1957.- 408 с.
4. Cobiax Technologies AG [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cobiax.com/startseite>
5. AirDeck® System. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.airdeck.com>
6. BubbleDeck® System. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.bubbledeck-uk.com>.
7. Zuo Z.H. Combining genetic algorithms with BESO for topology optimization / Y.M. Xie, X. Huang// *Structural and Multidisciplinary Optimization*. - 2009.- Vol. 38(5).- p. 511-523.
8. Tcherniak D. Topology optimization of resonating structures using SIMP method / D. Tcherniak // *International Journal of Numerical Methods Engineering*. -2002.-Vol. 54(11). - p. 1605-1622
9. Оганесян П.А. Оптимізація топології конструкцій у пакеті ABAQUS / П.А.Оганесян, С.Н. Щевцов // *Звістки Самарського наукового центру Російської академії наук*. - 2014.- Том 16. №6(2). -С. 543-549
10. Ciarlet Ph. *Mathematical elasticity* / Ph.Ciarlet. – N.Y.: Elsevier, 1997. - 497p.
11. Clough R.W. *Finite element analysis of dynamic response* / R.W. Clough, K.I. Bathe // *The Univ. of Alabama in Huntsville Press*.- 1972.-№6. - p.153-159.
12. Шмуклер В.С. Каркасні системи полегшеного типу: монографія / В.С. Шмуклер, Ю.А. Клімов, М.П. Бурак .- Харків: Золоті сторінки, 2008.- 336 с.
13. Васильков Г.В. Еволюційна теорія життєвого циклу механічних систем. Теорія споруджень : навч. посіб. / Г.В. Васильков. - Москва: Видавництво ЛКІІ, 2008.- 320 с.
14. Вибрані завдання по будівельній механіці й теорії пружності: навч. посіб. / Н.П. Абовський [та ін.]; за ред. Н. П. Абовського. – Москва: Наука, 1978. - 189 с.
15. Малінін М.Н. Прикладна теорія пластичності та повзучості: навч. посіб / М.Н. Малінін.– Москва: Машинобудування, 1968. - 400 с.
16. Гагауз Ф.М. Проектування многолонжеронного крила з композиційних матеріалів / Ф.М. Гагауз // *Авіаційно-космічна техніка й технологія*. -2005.- №2(18).- с.28-32.
17. Феодосьев В.І. Вибрані завдання й питання з опору матеріалів: навч. посіб. / В.І. Феодосьев. - Москва: Наука, 1996. -- 368 с.

References

1. V. Babaev, I. Ievzerov, S. Evel, A. Lantoukh-Liashchenko, V. Shevetovsky, O. Shimanovskiy, V. Shmukler, M. Sukhonos (2019). *Rational Design of Structural Building Systems: Monografiya*. Berlin / Germany: DOM publishers. ISBN 978-3-86922-733-7.
2. Shmukler V.S., Lugchenko O.I., & Nazhem A.H. (2020). Chiselna verifikaciya odnogo pidhodu bionichnoi racionalizaciyi konstrukcij. *Zb. nauk. pr. Ukrayinskogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transportu: Proceeding Scientific publication*, 189,36-52.
3. Shenli F.R. (1957). *Analiz vagi j micnosti litakovih konstrukcij*: Moskva: Oborongiz.
4. Cobiax Technologies AG. Retrieved from: <http://www.cobiax.com/startseite>
5. AirDeck® System. Retrieved from: <http://www.airdeck.com>
6. BubbleDeck® System. Retrieved from: <http://www.bubbledeck-uk.com>
7. Zuo Z.H., Xie Y.M., & Huang X.(2009). Combining genetic algorithms with BESO for topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 38(5), 511-523.
8. Tcherniak D. (2002). Topology optimization of resonating structures using SIMP method. *International Journal of Numerical Methods Engineering*, 54(11), 1605-1622.
9. Oganesyanyan P.A. & Shevcov S.N. (2014). Optimizaciya topologii konstrukcij u paketi ABAQUS. *Zvistki Samarskogo naukovogo centru Rosijskoyi akademiyi nauk*, 16, №6(2), 543-549
10. Ciarlet Ph. (1997). *Mathematical elasticity* / N.Y.: Elsevier
11. Clough R.W. & Bathe K.I. (1972). *Finite element analysis of dynamic response*. *The Univ. of Alabama in Huntsville Press*, 6, 153-159.
12. Shmukler V.S., Klimov Yu. A.& Burak N.P. (2008). *Karkasni sistemi polegshenogo tipu: monografiya*. Harkiv: Zoloty ctorinky
13. Vasilkov G.V.(2008). *Evolycijna teoriya zhittyevogo ciklu mehanichnih sistem. Teoriya sporudzen: Navchalnyi posibnik*. Moskva: Vidavnicтво LKI
14. Abovskiy N.P.(1978). *Vibrani zavdannya po budivel'nij mehanici j teorii pruzhnosti: Navchalnyi posibnik*. Moskva: Nauka
15. Malinin N.N. (1968). *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti: Navchalnyi posibnik*. Moskva: Mashinostroenie
16. Gagauz F.M. (2005). *Proektuvannya mnogolonzhernogo krila z kompozicijnih materialiv. Aviacijno-kosmichna tehnika j tehnologiya*, 2(18), 28-32.
17. Feodosev V.I. (1996). *Vibrani zavdannya j pitannya z oporu materialiv. Navchalnyi posibnik*. Moskva: Nauka

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.В. Кічаєва, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна.

Автор: ШМУКЛЕР Валерій Самуїлович
доктор технічних наук, професор, завідувач
кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail - v_shmukler@hotmail.com

Автор: НАЖЕМ Алі Хусейн
аспірант кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail - ali.h.najem@hotmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7247-4457>

Автор: ЛУГЧЕНКО Олена Іванівна
кандидат технічних наук, доцент кафедри
будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail - elenalugchenko@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5397-355X>

IMPROVEMENT OF CROSS SECTION OF COMPRESSED ELEMENTS BY TOPOLOGICAL RATIONALIZATION

V. Shmukler, O. Lugchenko, A. Nazhem

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The article describes the procedure of direct (rational) design of vertical compressed elements (columns, pylons, stiffening diaphragms, retaining walls). This technology is an exclusive modification of topological (bionic) rationalization. It is based on new energy principles and algorithms for sequential construction of geometric and / or physical-mechanical "image" of the structure. The example of the formation of energy-equivalent columns shows the sequence of computational operations of the method. The solution is built analytically in order to show the nuances of the necessary operations. At the same time, these examples show that the introduced optimization criteria in the form of $e_n \rightarrow \text{const}$ and $U \rightarrow \inf U$ (here e_n is the value of the normalized density of potential deformation energy, and U is the potential energy of deformation) determine, including the minimum volume of constructs, as well as their minimum deflections. A fundamental element of the approach is the use of a new criterion of the limit state, which provides an estimate of the intensity of the element. In this case, the properties of the material and the type of stress-strain state are taken into account. The obtained analytical solution was used as a control test for the general computational procedure of the method. In this regard, the article presents the results of the analytical and numerical solution. The efficiency of the computational procedure is confirmed by the speed of its convergence and the minimum difference of geometric parameters (topology) of the structure with test examples. The technological sequence of computational operations of the method is completed by the construction of elements (pylons) with a simple external and complex internal geometry.

Keywords: deformation, energy, iteration, voids, cavity, rationalization.