

УДК 624.9

**ЧИСЕЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ ОДНОГО ПІДХОДУ БІОНІЧНОЇ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ
КОНСТРУКЦІЙ**

Д-р техн. наук В. С. Шмуклер, канд. техн. наук О. І. Лугченко, аспірант А. Х. Нажем

**NUMERICAL VERIFICATION OF ONE APPROACH OF BIONIC RATIONALIZATION
OF STRUCTURES**

D. Sc. (Tech.) V. Schmukler, PhD (Tech.) O. Lugchenko, postgraduate student A. Nazhem

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.189.2020.213647>

Анотація. У статті викладена процедура прямого (раціонального) проектування балок. Дана технологія є ексклюзивною модифікацією топологічної (біонічної) оптимізації.

У її основі лежать нові енергетичні принципи й алгоритми послідовної побудови геометричного й/або фізико-механічного «образу» конструкції. На прикладі формування енергетично рівномірних балок показана послідовність обчислювальних операцій методу. Рішення будується аналітично з метою показування нюансів необхідних операцій. Одночасно на наведених прикладах показано, що введені критерії оптимізації у вигляді $e_n \rightarrow \text{const}$ і $U \rightarrow \inf U$ (тут e_n - значення нормованої щільності потенційної енергії деформацій, а U - потенційна енергія деформацій) зумовлюють у тому числі мінімальний об'єм конструктивів, а також їхні мінімальні прогини. Принциповим елементом підходу є використання нового критерію граничного стану, що забезпечує оцінку напруженості елемента. При цьому враховуються властивості матеріалу й вид напружено-деформованого стану. Отриманий аналітичний розв'язок використано як контрольний тест для загальної обчислювальної процедури методу. У зв'язку з цим у статті наведені результати аналітичного й чисельного розв'язку. Ефективність обчислювальної процедури підтверджена швидкістю її збіжності і мінімальним розходженням геометричних параметрів (топології) конструкції з тест-прикладом. Показано, що сформована результуюча складна структура балок може бути спрощена за рахунок уніфікації, яка проведена методом динамічного програмування. Технологічна послідовність обчислювальних операцій методу завершена побудовою елементів (балок) із простою зовнішньою й складною внутрішньою геометрією. Доцільність отриманих теоретичних результатів підтверджена шляхом їх впровадження при будівництві різних об'єктів.

Ключові слова: раціональність, щільність потенційної енергії деформації, січний модуль, біонічна оптимізація, енергетичний баланс, ітераційний процес.

Abstract. The paper provides the procedure of forward-engineering (intelligent) beam design. This technology is an exclusive modification of topological (bionic) optimization. It is based on the new energy principles and the algorithms for successive construction of geometric and/or physical-mechanical “pattern” of a structure. The sequence of computational operations of the method in question is illustrated on example of forming beams of energetically uniform strength. The solution is built analytically to show the nuances of the operations required. Simultaneously, the proceeding 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 potential deformation energy density, and U is the potential deformation energy) cause, including, the minimum volume of constructs, and their minimum deflections. A fundamental element of the given approach is the use of a new criterion for the limit state, which provides an estimate of the element's stress. In this case, the properties of the material and the type of the stress and strain state are taken into account. The analytical solution obtained was used as a checkup test for the general computational procedure of the method in question. In this connection, the paper features the results of analytical and numerical solutions. The efficiency of the computational procedure is confirmed by the rate of its convergence and the minimal variation of geometrical construction parameters (topology) with test cases. It is shown that the resultant stepwise complex beam structure can be simplified through unification, which is carried out by the method of dynamic programming. The technological flow of computational operations of the method in question is completed by the construction of elements (beams) with basic external and complex internal geometry. The feasibility of the theoretical results obtained is confirmed by their implementation in the construction of various projects.

Keywords: rationality, density of potential deformation energy, intersecting modulus, bionic optimization, energy balance, iterative process.

Вступ. Розглядається задача про аналітичне наближене визначення характеру зміни висоти симетрично завантаженої балки. Розв'язок будується в рамках ідеології, викладеної в роботах [1, 2]. Відносна простота постановки проблеми жодним чином не звужує загальної процедури, а призначена винятково для одержання розв'язку в кінцевому вигляді. Крім того, застосований підхід є однією з модифікацій нового прогресивного напрямку, названого топологічною (біонічною) оптимізацією, що забезпечує формування конструктивних систем з наперед заданими позитивними властивостями [3, 4]. Позначений алгоритм фундований новими енергетичними принципами, що відрізняє його від згаданих вище результатів і насамперед за рахунок його фізичної прозорості. Важливим також є факт використання запропонованих технологій у робочому проектуванні й зведенні конструкцій, геометрія, а за необхідності й фізичні характеристики яких знайдені розрахунковим, а не інтуїтивним шляхом [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як показує практика, найбільш ефективним методом зниження власної ваги залізобетонних конструкцій є створення в них внутрішніх порожнеч. Традиційно в основному для збірних залізобетонних конструкцій використовують заводську пуансонну технологію, що забезпечує організацію тільки односпрямованих порожнин,

обмежених розмірів. При монолітному будівництві з'являється можливість надання порожнинам певної конфігурації й розмірів. Однак значної різноманітності форм вкладишів порожниноутворювачів, а також їхніх розмірів не спостерігається. Наслідком цієї обставини є виняткове зниження власної ваги конструктиву. Відомі конструктивні системи, такі, наприклад, як Airdeck (США), Bubbledeck (США), Cobiax (ФРН), U-Boot Beton (ФРН) та інші, вирішують саме це завдання. Перераховані технології використовують для вкладишів стандартні розв'язки з застосуванням вторинної пластмаси. У зв'язку із цим вони мають істотні недоліки (у першу чергу високу ціну), 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) [3, 4]. Ці методи фундують відомий програмний комплекс ABAQUS [3–5].

Однак істотний додатковий ефект може бути отримано у випадку надання вкладишам обґрунтованої (розрахованої) просторової конфігурації, що визначає раціональну роботу (опір) конструкції. Згадане демонструється інформацією, наведеною в таблиці.

Таблиця

Основні техніко-економічні показники конструкцій полегшених перекриттів (конструктивна товщина перекриття 25 см)

Назва технології	Характеристика вкладишів				Наведена товщина перекриття	
	Об'єм одного вкладиша, см ³	Крок вкладишів, см	Відносна кількість вкладишів, шт./м ²	Відносний об'єм вкладишів, м ³ /м ²	см	відсоток конструктивної
Airdeck	4100	30	11	0,045	20,4	81,6
BubbleDeck	3100	20	25	0,076	17,2	68,8

Cobiax	9100	35	8,2	0,075	17,5	70,0
U-Boot Beton	28000	64	2,44	0,068	18,2	72,8
Монофант [11] (пінополістирол)	96000	100	1	0,096	13,0	52,0

З таблиці видно, що найважливіший показник – наведена товщина перекриття при використанні вкладишів з пінополістиролу значно менша, ніж для інших технологій, що в результаті веде до істотної мінімізації ваги конструкцій. Крім того, відзначається можливість використання цих конструкцій не тільки для нового будівництва, а також для реконструйованих будинків і споруд.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є одержання аналітичного й чисельного розв'язків задачі прямого проектування, згинальних елементів, результат яких поданий у вигляді геометричного «образу» конструкцій. Тут, на відміну від традиційного перевірного підходу, постулюється варіант постановки й розв'язання задачі топологічної оптимізації. Відмінність використовуваної процедури полягає в прийнятті нових критеріїв раціоналізації, що носять енергетичний характер. Крім того, вирішено завдання уніфікації знайдених геометричних параметрів конструкції й надання їй у вигляді порожнистого елемента. Наведено результати впровадження позначених конструктивних елементів.

Основна частина дослідження. У роботі прийнято такі гіпотези й припущення:

- розглядається плоска задача;
- вводиться припущення про ідентичність діаграм «напруження–

деформація» матеріалу конструкції балки для деформацій стиску й розтягу;

- постулюється можливість побудови діаграм «дотичне напруження – деформація зсуву» на базі трансформації діаграм стиску (розтягу) [6];

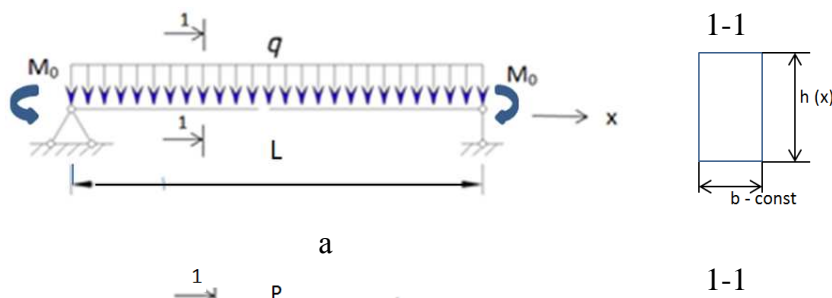
- ухвалюється положення про раціональність рівномірного розподілу погонної фібрової щільності потенційної енергії деформації (ЩПЕД);

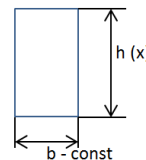
- ухвалюється концепція січного модуля [7];

- ігнорується внесок енергії дотичних напружень порівняно з внеском енергії нормальних напружень до загального енергетичного балансу.

Математична модель. Вводиться в розгляд статично визначена симетрично завантажена балка (рис. 1). Мають місце два види завантаження: рівномірно розподілене навантаження й зосереджена сила, прикладена в центрі прогону. Для можливості використання надалі отриманого розв'язку для статично невизначених систем, включаючи спеціальні умови на кінцях балки, до опор прикладений момент $M_0 \in (0; M_u)$, де M_u – граничний момент.

Переріз балки (для спрощення) прийнятий прямокутним. При цьому $b = const$, $h(x)$ підлягає визначенню. Тут b – ширина перерізу, а $h(x)$ – висота.





б

Рис. 1. Розрахункова схема балки: а – завантаження 1; б – завантаження 2

Діаграми матеріалу (задана й трансформована, за роботою [6]) наведені на рис. 2.

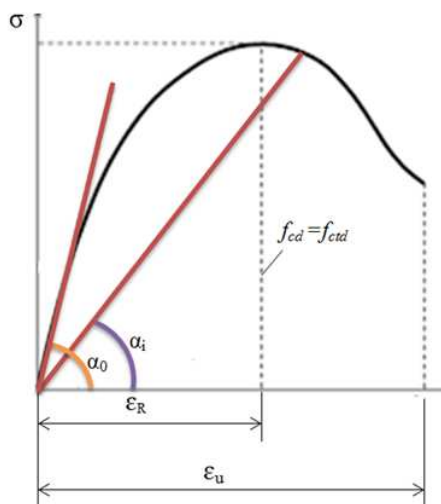
Відповідно до роботи [1] запишемо вираз для ЩПЕД:

$$e = e_{\sigma} + e_{\tau} = e_n, \quad (10)$$

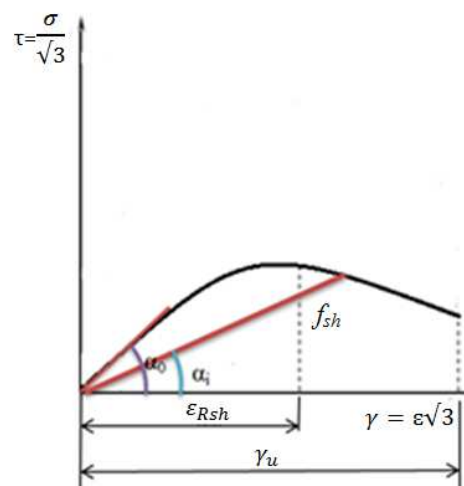
де e_{σ} – щільність потенційної енергії деформацій, що накопичується від нормальних напружень;

e_{τ} – щільність потенційної енергії деформацій, що накопичується від дотичних напружень; внаслідок прийнятої гіпотези $e_{\tau} = 0$;

e_n – нормоване значення ЩПЕД, $e_n = \gamma \cdot e_u$, e_u – граничне значення ЩПЕД, $\gamma \in ((0,1))$, γ – статистично обґрунтований параметр.



а



б

Рис. 2. Діаграми матеріалу: а – задана; б – трансформована; σ, τ – нормальні й дотичні напруження; ϵ, γ – лінійна й кутова деформації; f_{cd}, f_{ctd}, f_{sh} – межі міцності матеріалу; $E_0 = tg \alpha_0$; $E_c = tg \alpha_i$ – січні модулі

Тоді для ЩПЕД будемо мати

$$e_{\sigma} = \frac{\sigma^2}{2E_0}. \quad (2)$$

Проте для визначення головних напружень враховуються дотичні напруження [8]

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2}, \quad (3)$$

де $\sigma_{1,3}$ – головні напруження.

Максимальні нормальні й дотичні напруження, як відомо, дорівнюють

$$\sigma = \frac{M(x)}{W}, \quad (4)$$

$$W = \frac{b \cdot h^2(x)}{6}; \quad I = \frac{b \cdot h^3(x)}{12}; \quad S = \frac{b \cdot h^2(x)}{8}; \quad (6)$$

$M(x)$, $Q(x)$ – згинальний момент і поперечна сила в перерізі.

У свою чергу граничне значення ЩПЕД визначається за роботою [1]

$$e_u = 0,5 \chi_\sigma^2 [(\chi_\sigma + 1)e_{uc} + (\chi_\sigma - 1)e_{ut}] + (1 - \chi_\sigma^2)e_{ush} \quad (7)$$

або з урахуванням того, що $e_{uc} = e_{ut} = e$ [2],

$$e_u = \chi_\sigma^2 e + (1 - \chi_\sigma^2)e_{ush}, \quad (8)$$

де $\chi_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ – параметр Лоде-Надаї напруженого стану; $\sigma_2 = 0$;

$e_{uc}; e_{ut}; e_{ush}$ – парціальні ЩПЕД для деформацій стиску, розтягу й зсуву.

Підставляючи у вирази (1)–(4) вирази (5), (6), (8), одержимо

$$h^4(x) - \frac{18 \cdot M^2}{b^2 \cdot E_i \cdot \gamma \cdot e_u} = 0, \quad (9)$$

де $x \in (0, \frac{L}{2})$;

L – прогін балки.

Для першого завантаження

$$M(x) = -M_0 + \frac{qLx}{2} - \frac{qx^2}{2}. \quad (10)$$

Для другого завантаження

$$\tau = \frac{Q(x) \cdot S}{b \cdot I}, \quad (5)$$

де W , I , S – момент опору, момент інерції й статичний момент перерізу балки. Усі ці величини є функціями координати « x »,

$$M(x) = -M_0 + P \frac{x}{2}. \quad (11)$$

Розв'язуючи вираз (9), одержимо

$$h(x) = 4 \sqrt{\frac{18M(x)^2}{b^2 \cdot E_i \cdot \gamma \cdot e_u}}. \quad (12)$$

Для випадку $M_0=0$ (статично визначена задача) розв'язок остаточний. При $M_0 \neq 0$ і необхідності його уточнення задача розв'язується ітераційно, у процесі чого уточнюється M_0 за апіорі заданим критерієм.

Чисельна реалізація задачі. Для чисельного аналізу розглянута статично визначена симетрично завантажена балка (рис. 1). Прогін балки $l = 6$ м. Стартовий переріз балки визначений з використанням традиційного методу зворотного проектування і прийнятий $b \times h = 200 \times 500$ мм. При цьому $b = const$, а висота $h(x)$ підлягає визначенню при розв'язанні задачі з умови енергетичної рівномірності. Для проектування прийнятий бетон класу С30/35 ($f_{cd} = 19$ МПа; $f_{ctd} = 1.33$ МПа). Крок розбиття половини балки за довжиною дорівнює 0.1 м. Розглядаються два окремі випадки завантаження балки: рівномірно

розподілене навантаження (завантаження № 1) і зосереджена сила, прикладена в центрі прогону (завантаження № 2).

Завантаження № 1. Прийнято рівномірно розподілене погонне навантаження $g=30 \text{ кН/м}$. Розрахунок балки за наданим раніше алгоритмом зображено графічно на рис. 3, 4.

Завантаження № 2. Прийнята зосереджена сила, прикладена в середині прогону балки $P=200 \text{ кН}$. Розрахунок балки за наданим раніше алгоритмом зображено графічно на рис. 5, 6.

З метою зменшення обсягу обчислень введені однакові діаграми «напруження – деформації» для стиску й розтягу.

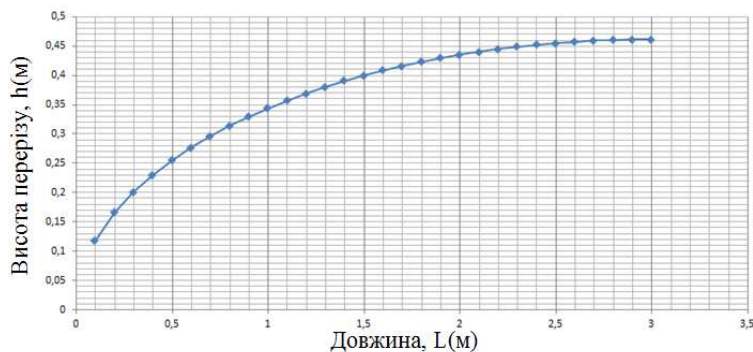


Рис. 3. Зміна висоти перерізу енергетично рівномірної балки. Завантаження № 1

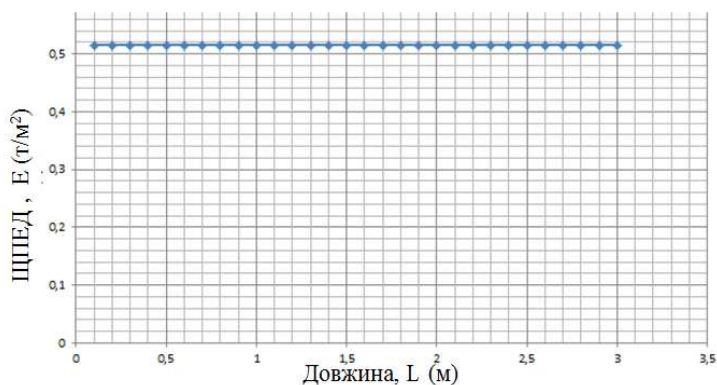


Рис. 4. Розподіл фібрової ЩПЕД за довжиною балки. Завантаження № 1

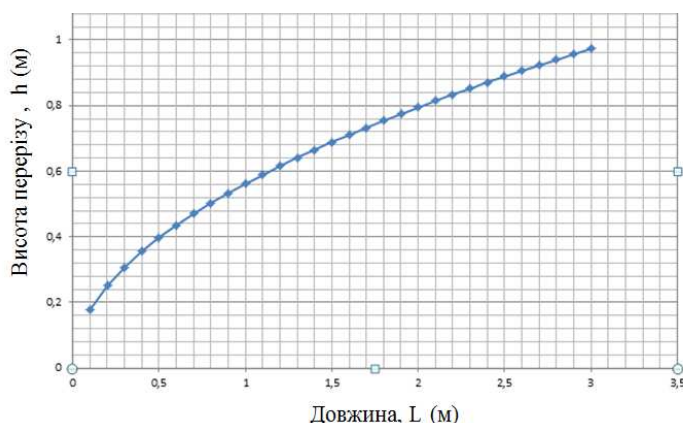


Рис. 5. Зміна висоти перерізу енергетично рівномірної балки. Завантаження № 2

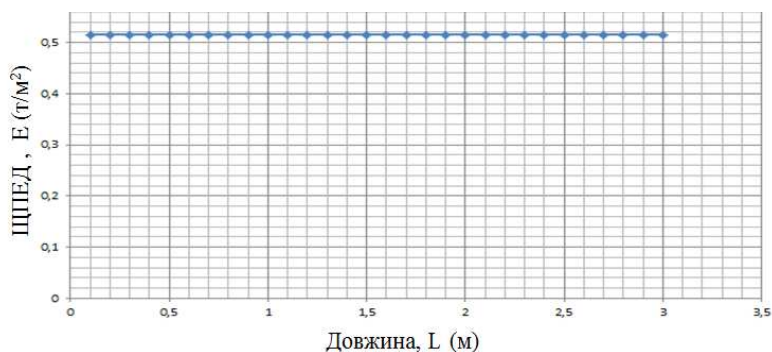


Рис. 6. Розподіл фібрової ЩПЕД за довжиною балки. Завантаження № 2

Додатково до виразу (12) має бути операція визначення $h(x)$ в опорних перерізах. Виконання позначеної процедури для випадку $e_\tau \neq 0$, дає

$$h_0 = \sqrt{\left[\frac{\gamma_1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\gamma_2}{\gamma_1}} \right) \right]}, \quad (13)$$

де h_0 – висота опорного перерізу;

$$\gamma_1 = \frac{9 \cdot Q_0^2}{8 \cdot b^2 \cdot E_0 \cdot \gamma \cdot e_u \cdot f};$$

$$\gamma_2 = \frac{18 \cdot M_0^2}{b^2 \cdot E_0 \cdot e_u};$$

де M_0, Q_0 – згинальний момент і перерізаюча сила в опорному перерізі;

f – емпіричний коефіцієнт;

E_0 – початковий модуль деформації 1-го роду.

З метою встановлення відносної універсальності критеріїв, позначених у роботі [2], слід оцінити жорсткість стрижня змінного перерізу, отриманого в наведених раніше задачах. Дана обставина є логічним доповненням того факту, що розв'язок виразу (12) визначає мінімальні витрати матеріалу. Тут і надалі матеріал балки вважається однорідним, що автоматично дозволяє замість ваги розглядати об'єм. У зв'язку з цим доцільно порівняти об'єм матеріалу отриманого стрижня з об'ємом матеріалу балок, що знаходяться у позначених умовах, при їхніх

однакових максимальних прогинах, але при інших розподілах висот. Зокрема розглядається задача про мінімізацію обсягу балки при заданому прогині (ізопериметрична задача) [9]. Характер зміни висоти у цьому випадку визначений виразами:

○ для рівномірно розподіленого навантаження

$$h(x) = [3\lambda\xi^2(1-\xi)]^{\frac{1}{4}}, \quad (14)$$

де $\lambda = 0,0217a^{-\frac{4}{3}}$;

де $a = \frac{f_{\max} \cdot b \cdot E_0}{3 \cdot q \cdot L^4}$;

де f_{\max} – максимальний прогин у центрі балки; $f_{\max} \in (\frac{L}{200}; \frac{L}{400})$;

$$\xi = \frac{x}{L};$$

○ для зосередженої сили в середині прогону

$$h(x) = 0.696 \cdot a_1^{-\frac{1}{3}} \cdot \xi^2, \quad (15)$$

де $a_1 = \frac{f_{\max} \cdot b \cdot E_0}{3 \cdot q \cdot L^3}$.

Природно, і це відзначається в роботі [9], дані розв'язки потребують перевірки на міцність. Перевірка показує,

що для вихідних даних наведених прикладів умови міцності перерізів не виконуються. Характер зміни висоти балки наведений на рис. 7.

Розміри поперечного перерізу балки суцільного перетину, за роботою [9], прогин якої $f_{max}=1.5$ см, $b \times h = 200 \times 425$ мм (для завантаження № 1) і $b \times h = 200 \times 470$ мм (для завантаження № 2). Однак вимоги

міцності тут також не виконуються. Мінімальні розміри перерізу балки, при яких виконуються обмеження за міцністю і жорсткістю, дорівнюють $b \times h = 200 \times 470$ мм (для завантаження № 1) і $b \times h = 200 \times 690$ мм (для завантаження № 2). Порівняння об'ємів матеріалу отриманих балок наведено на рис. 8, 9.

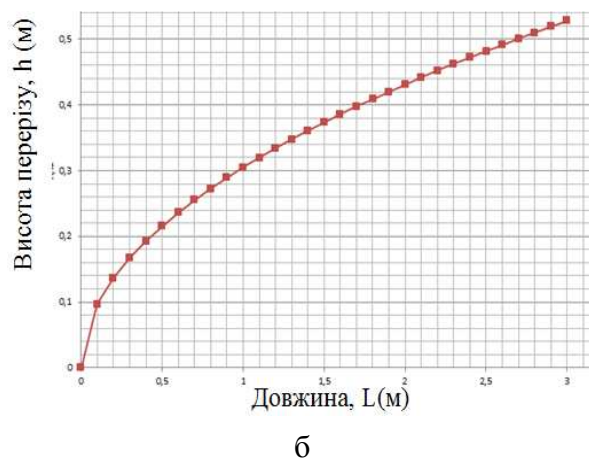
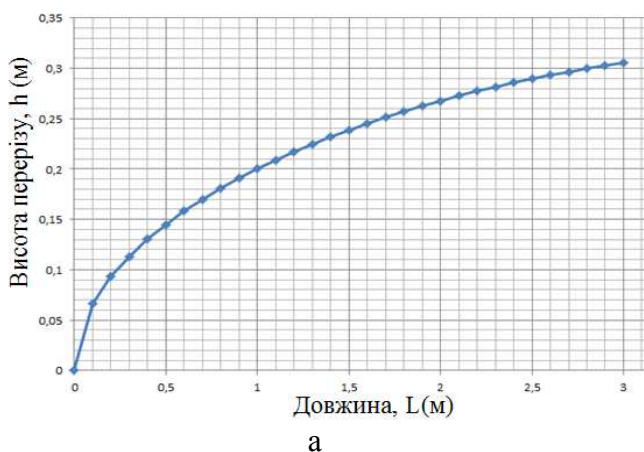


Рис. 7. Зміна висоти перерізу балки мінімального об'єму при заданому прогині $f_{max}=1.5$ см: а – завантаження № 1; б – завантаження № 2

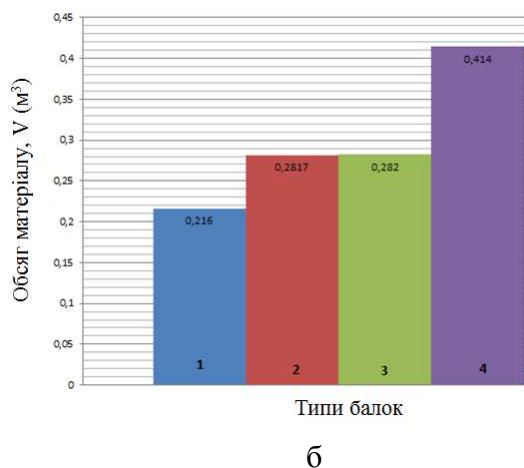
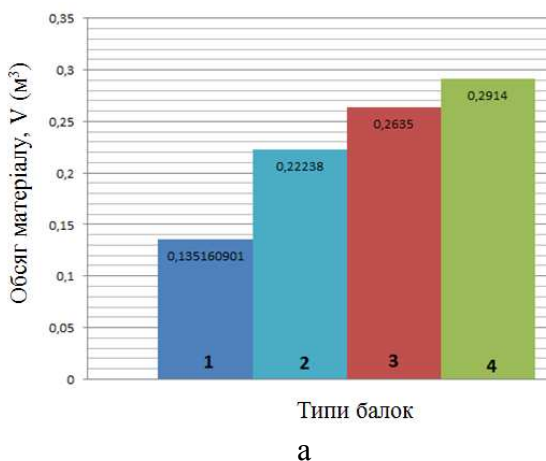


Рис. 8. Об'єм матеріалу розглянутих балок: а – завантаження № 1; б – завантаження № 2; 1 – балка мінімального об'єму при заданому прогині; 2 – балка з рівномірними перерізами; 3 – балка суцільного перерізу при заданому прогині; 4 – балка постійного перерізу, підібраного з дотриманням обмежень за міцністю і жорсткістю

Виконані вище розрахунки й аналіз наведених діаграм дозволяють зробити

висновок про те, що міцнішим і деформаційним обмеженням відповідають

тільки балки 2 і 4. Проте витрати матеріалу в балці, переріз якої визначено з використанням запропонованої в даній роботі ідеології, на 31% нижче витрат матеріалу в балці, підбраної з використанням традиційного методу зворотного проектування (завантаження № 1). У випадку завантаження балки зосередженою силою в середині прогону (завантаження № 2) цей показник склав 46.8%

Технологія побудови розв'язків.

Загальний випадок [1]. Процедура пошуку розв'язків для розглянутої проблеми в загальному випадку складається з формування «еталонної» й остаточної частин. При цьому домінуючою складовою запропонованого тут підходу є методологія побудови «еталонного» розв'язку. У її основі лежить компіляція, що синтезує в собі метод кінцевих елементів і метод адаптивної еволюції [1]. Комбінація методу кінцевих елементів і методу регулювання параметрів системи, особливо у формі методу адаптивної еволюції, обумовлює можливість побудови процедури прямого визначення фізико-геометричних характеристик конструкцій. Сформований алгоритм припускає визначення внутрішніх параметрів системи як результат послідовної побудови енергетично рівномірної системи. Як відомо, саме оптимізована рівномірна система забезпечує мінімізацію витрат матеріалу конструктиву.

Сказане означає поняття «еталонної» конструкції як системи, у якій у всіх елементах виконується умова $e = const$ (e – щільність енергії деформацій). Для найменш матеріаломістких систем $e = e_u$ (e_u – гранична щільність енергії деформацій) [1]. Побудований компілятор визначає ітераційне уточнення геометричних або (і) фізико-механічних параметрів системи відповідно до умови $e \rightarrow e_u$. При цьому на кожному кроці ітераційного процесу експлуатується метод кінцевих елементів, а еволюційна адаптація полягає в можливості урахування на i -му

кроці величин параметрів, отриманих з будь-яких попередніх кроків (спадковість). Отриманий розв'язок у загальному випадку не задовольняє обмеження за переміщеннями, шириною розкриття тріщин, частотами власних коливань, технологічними і т. д. Дана обставина призводить до необхідності збільшення перерізів енергетично рівномірного елемента. У зв'язку з цим формується додаткова задача:

$$\Delta V(\{\alpha\}) \rightarrow \inf, \quad (16)$$

$$\omega^{\min} \geq \omega_{adm}; a_{crc}^{\max} \leq a_{adm}; f^{\max} \leq f_{adm}, \quad (17)$$

де ΔV – додатковий об'єм матеріалу;

$\{\alpha\}$ – вектор розшукуваних параметрів;

$\omega^{\max}; \omega_{crc}^{\max}; f^{\max}$ – мінімальне (максимальне) значення частоти власних коливань, ширини розкриття тріщин і прогину;

$\omega_{adm}; a_{adm}; f_{adm}$ – відомі постійні, прийняті, як правило, на підставі національних норм.

Розв'язання задачі (16), (17) зводиться до пошуку деякого нового, відносно еталонного, ізоенергетичного стану системи, при якому $e < e_u \wedge e_{mi} = const$. Топологія еталонної, тобто енергетично рівномірної, системи ($e = e_u$) ухвалюється за початкове наближення (e_{mi} – знижене значення граничного значення щільності потенційної енергії).

Далі для еталонного розв'язку перевіряється виконання обмежень (17). У випадку їх задоволення даний розв'язок вважається остаточним. У загальному ж випадку еталонний розв'язок не буде розв'язком виразів (16), (17). Тоді вводиться поняття умовної граничної щільності енергії деформацій e_{um} (m – номер нерівності у виразі (17)).

У подальшому процедура будується за типом алгоритму Кіффера-Джонсона виходу на межу області припустимих розв'язків. У результаті експлуатації розглянутого ітераційного алгоритму визначаються геометрія й (або) фізико-механічні характеристики нової конструкції.

Специфічною особливістю тут є той факт, що параметрами керування можуть служити фізико-механічні параметри кінцевого елемента

$$C_{i+1}^L = (e_L e_n^{-1}) C_i^L, \quad (18)$$

де i – номер ітерації;

C_i^L – фізико-механічний параметр, у загальному випадку для анізотропного L -го кінцевого елемента на i -му кроці ітерації.

У випадку ізотропного тіла залежність (18) набуває вигляду

$$E_{i+1}^L = (e_L e_n^{-1}) E_i^L, \quad (19)$$

де E_i^L – модуль деформації 1-го роду.

При цьому коефіцієнт поперечної деформації може (за необхідності) ухвалюватися за замовчуванням як неварійований через незначний інтервал його зміни $\nu \in (0,0,5)$. В остаточному вигляді еталонний розв'язок являє собою сукупність модулів деформації, що відповідає енергетично рівномірному елементу. Тоді структура «еталонної»

конструкції в синергетичному сенсі може формуватися за рахунок керування полем E . У цьому випадку E є узагальненим параметром.

Ще раз підкреслимо, що запропонований метод пошуку раціональної структури конструктивних систем має чіткий фізичний сенс і добре корелює з загальнофізичними уявленнями про їхній опір зовнішнім впливам.

Ізоенергетичність як раціональна форма існування штучних елементів властива природним самоорганізованим системам і забезпечує найбільш прийнятний розподіл матеріалу, а також його ефективну роботу в конструкції. Обчислювальний аспект проблеми зводиться до створення надбудов над існуючими обчислювальними комплексами, алгоритми яких фундовані методом кінцевих елементів. З огляду на смисловий зміст запропонованого методу, інші віртуальні аналогічні реалізації, а також відкритий доступ до інтерфейсів обчислювальних комплексів, з'являється можливість їх зчленування з програмами, що генерують параметри, які при традиційному проектуванні задаються примусово (вихідні дані). Як ілюстрація застосування загального підходу нижче наводяться результати розв'язання розглянутих прикладів, отримані на підставі позначеного алгоритму. Розв'язок знаходився в середовищах «Ліра 10.6» і декількох спеціально складених утиліт (рис. 9).

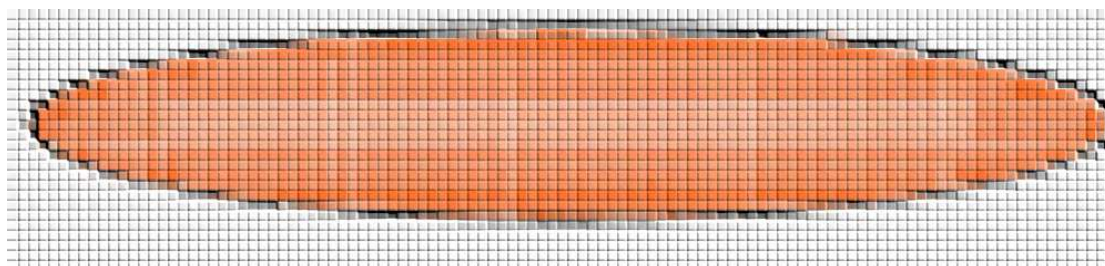


Рис. 9. Розв'язання завдання (завантаження № 1) загальним методом.

Світле поле відповідає значенням $E \approx 0$

Як впливає з зіставлення розрахованих топологій балок (рис. 8), відмінності результатів практично не спостерігаються. Тут слід зазначити ту обставину, що при експлуатації запропонованого підходу нема необхідності переформатизації сітки кінцевих елементів на кожному кроці ітераційної процедури (рис. 9).

Уніфікація конструкції. Для спрощення створюваної технологічної процедури доцільно уніфікувати переріз отриманої енергетично рівномірної балки. Розв'язок будується методом динамічного програмування Р. Белмана. Варіанти уніфікації половини довжини балки до 2, 3 і 4 шаблів наведені на рис. 10–12.

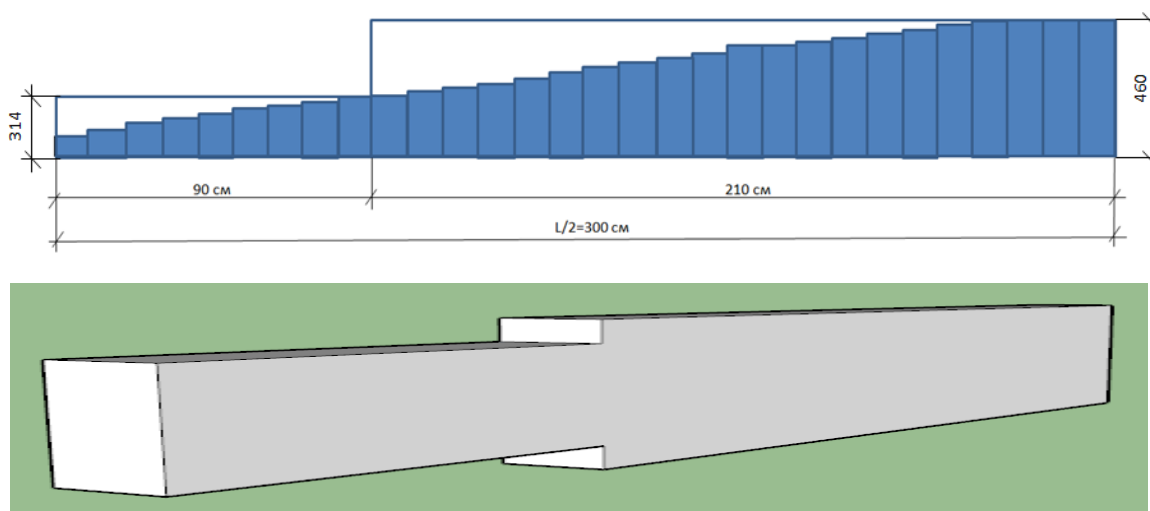


Рис. 10. Варіант уніфікації половини довжини балки (2 шаблі)

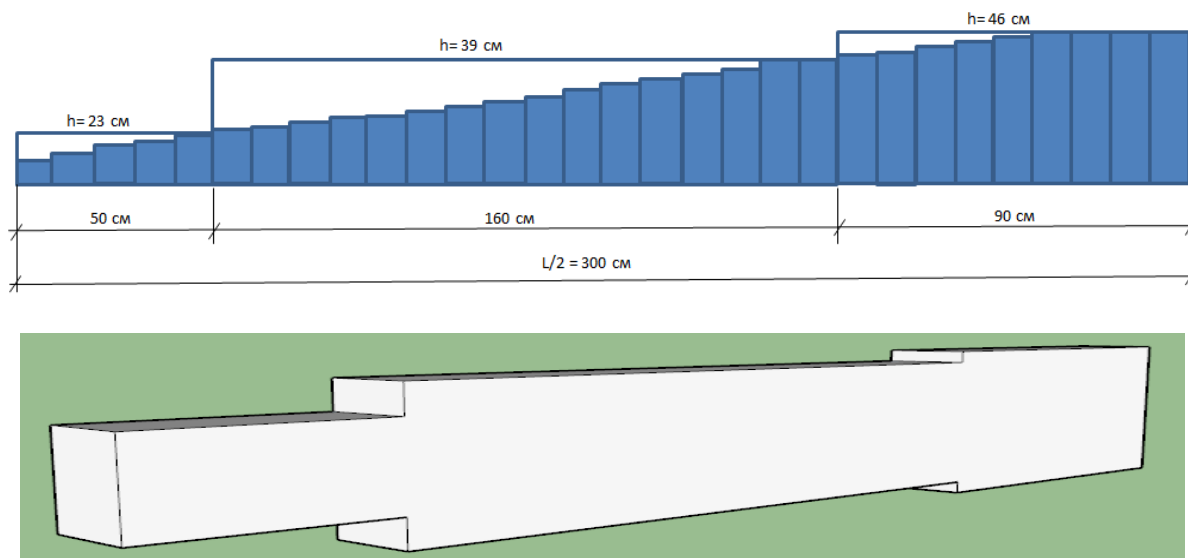


Рис. 11. Варіант уніфікації половини довжини балки (3 шаблі)

Як бачимо з рисунків, об'єм матеріалу балки, який додається до її перерізу, у результаті уніфікації збільшується зі зменшенням кількості її шаблів. Залежність витрат матеріалу балки при уніфікації її перерізу від кількості шаблів за її довжиною наведена на рис. 13.

Як відзначено в роботі [1], одним з можливих напрямів при проектуванні раціональних будівельних конструкцій взагалі й залізобетонних зокрема є

створення елементів із простою зовнішньою і складною внутрішньою геометрією.

Простота зовнішніх форм, як відомо, породжує простоту конструктивних розв'язків вузлів стикування різнорідних частин спорудження й забезпечує, як наслідок, можливість реалізації віртуального об'ємно-планувального розв'язку.

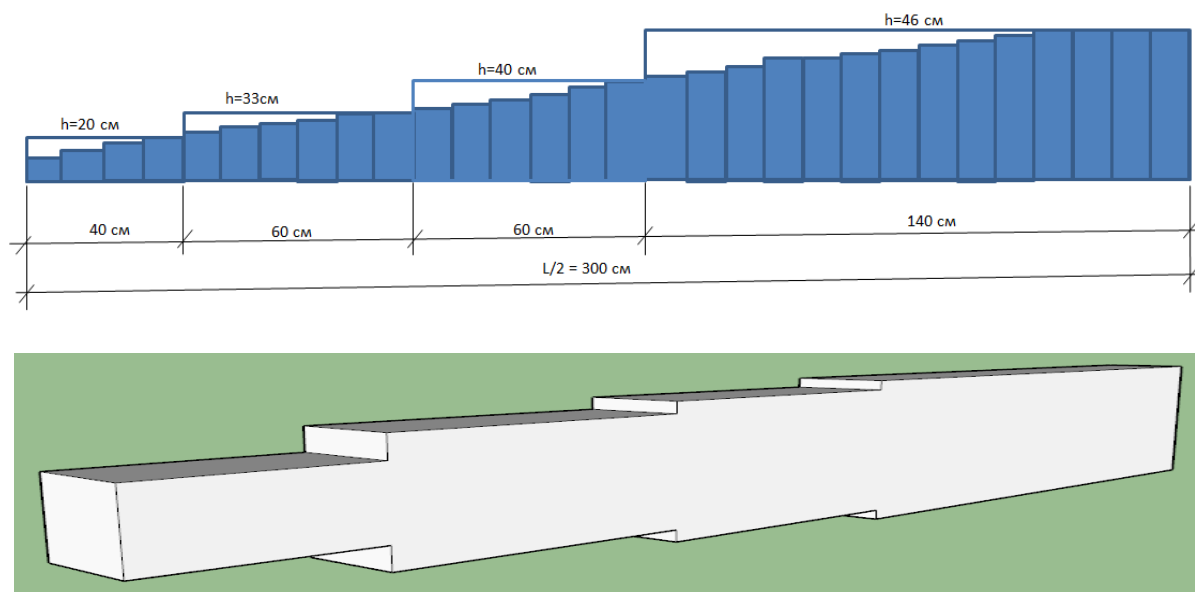


Рис. 12. Варіант уніфікації половини довжини балки (4 шаблі)

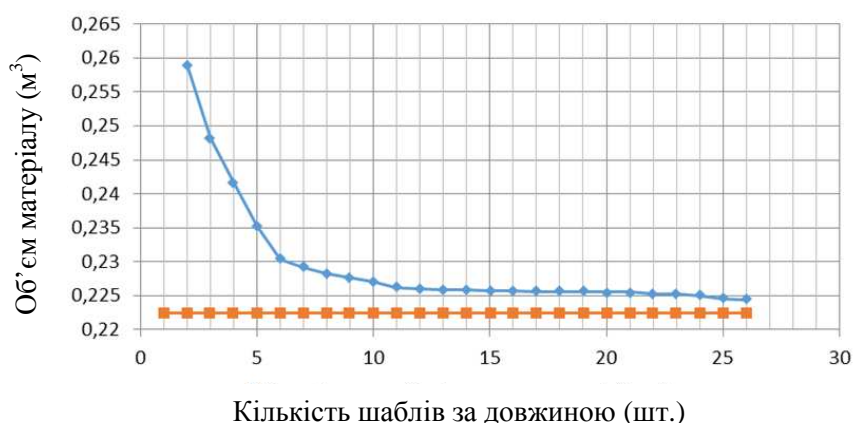


Рис. 13. Витрати матеріалу балки при уніфікації її перерізу

У свою чергу спрямоване ускладнення внутрішньої геометрії визначає задоволення необхідного набору критеріїв і обмежень, що означають ефективність конструкцій.

Використовуючи формули, запропоновані в роботі [1], визначимо геометричні розміри коробчатого перерізу досліджуваних балок, які мають рівнозначні геометричні характеристики (W , I , S) на кожній ділянці за довжиною, причому товщину стінок коробчатого перерізу ухва-люємо постійною й рівною

50 мм. Таким чином, формується енергетично рівномірна балка з простою зовнішньою і складною внутрішньою геометрією (рис. 14, 15).

Реалізація отриманих розв'язків здійснена в рамках формування елементів конструктивних систем зі збірного й монолітного залізобетону (системи РАМПА, ІКАР, ДОБОЛ, МОНОФАНТ) [1, 10]. Тут складна внутрішня геометрія формується за рахунок вкладишів-пустотоутворювачів з пінополістиролу з $\gamma = 25 \text{ кг/м}^3$ (рис. 16-17).

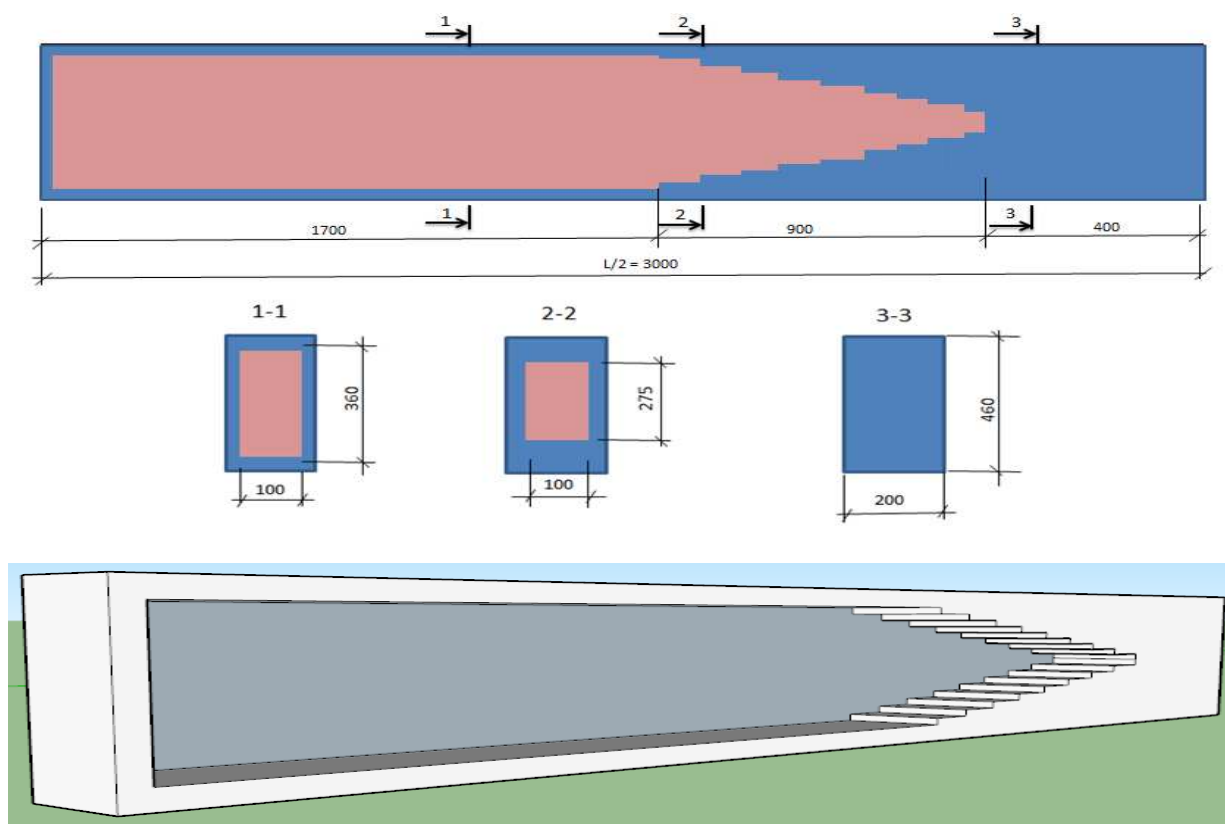


Рис. 14. Внутрішня структура половини (через симетрію) довжини балки з простою зовнішньою і складною внутрішньою геометрією (завантаження № 1)

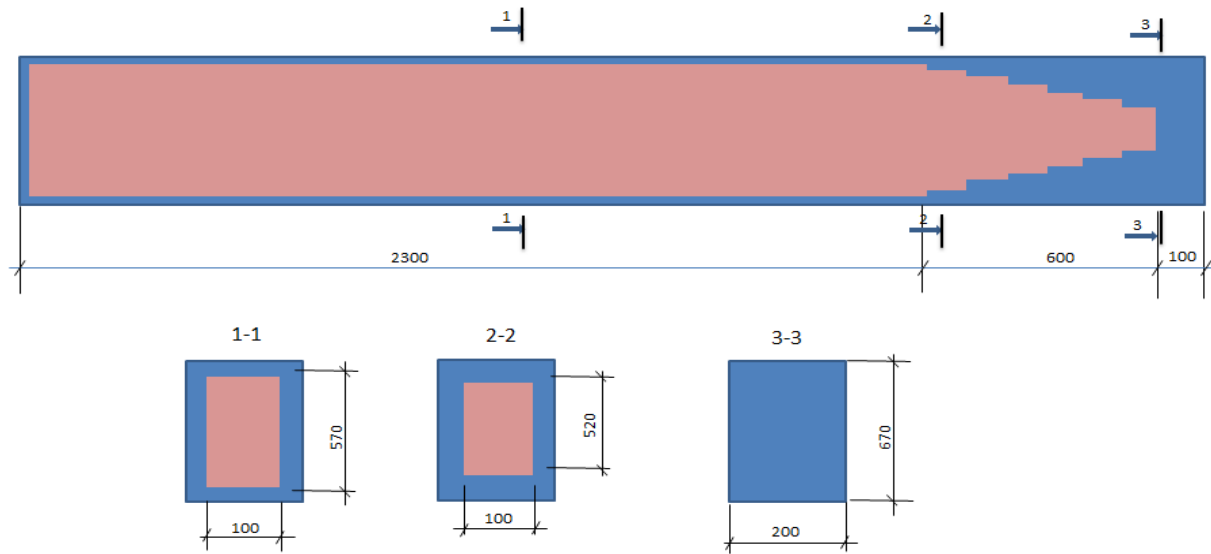


Рис. 15. Внутрішня структура половини (через симетрію) довжини балки з простою зовнішньою і складною внутрішньою геометрією (завантаження № 2)



а



б

Рис. 16. Розважальний комплекс «Місто», м. Харків: а – загальний вигляд; б – конструкція фундаментної плити



а



б

Рис. 17. Торгово-офісний будинок, м. Харків: а – загальний вигляд;
б – конструкція плити перекриття

Висновки. Отриманий переріз балки визначено, як вказувалося вище, шляхом використання нового прогресивного напрямку, названого топологічною (біонічною) оптимізацією, що забезпечує формування конструктивних систем з наперед заданими позитивними властивостями. Слід зазначити, що безліч об'єктів живої природи мають складну внутрішню геометрію. Доцільно розглянути структуру кісток скелетів людини й тварин, стовбури дерев, листя рослин та ін. Ще Галілео Галілей, досліджуючи міцність порожнистих балок, указував «... кілька зауважень щодо опору

твердих тіл порожнистих або порожніх усередині, якими як майстри, так і природа користуються на тисячі ладів. У них без зростання ваги досягається зростання міцності в досить великому ступені, як те легко можна бачити на кістках птахів і на очереті, які при великій легкості відрізняються й великою опірністю вигину й зламу. ... Було помічено на ділі й підтверджене досвідом, що палиця, порожня усередині, а також дерев'яна й металева труба, міцніше, ніж масивне тіло тієї ж довжини й рівної ваги, яке неминуче є більш тонким ...» [11].

Список використаних джерел

1. Шмуклер В. С., Климов Ю. А., Бурак Н. П. Каркасные системы облегченного типа: монография. Харьков, 2008, 336 с.
2. Васильков Г. В. Эволюционная теория жизненного цикла механических систем. Теория сооружений. Москва: Издательство ЛКИ, 2008. 320 с.
3. Zuo Z. H., Xie Y. M., Huang X. Combining genetic algorithms with BESO for topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2009. Vol. 38(5). P. 511-523.
4. Tcherniak D. Topology optimization of resonating structures using SIMP method. *International Journal of Numerical Methods Engineering*. 2002. Vol. 54(11). P. 1605-1622.
5. Оганесян П. А., Шевцов С. Н. Оптимизация топологии конструкций в пакете ABAQUS. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16. № 6(2). С. 543-549.
6. Феодосьев В. И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. Москва: Наука, 1996. 368 с.
7. Шэнли Ф. Р. Анализ веса и прочности самолетных конструкций. Москва: Оборонгиз, 1957. 408 с.

8. Гольденблат И. И., Копнов В. А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов: учеб. пособие. Москва, 1968. 192 с.
 9. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости: учеб. пособие / Н. П. Абовский и др.; под ред. Н. П. Абовского. Москва, 1978. 189 с.
 10. Эффективные железобетонные конструкции: монография / В. Н. Бабаев и др.; под ред. А. И. Адилходжаева, В. С. Шмуклера. Ташкент, 2019. 416 с.
 11. Галилей Галилео. Избранные труды в 2-х томах. Т. 2. Москва: Наука, 1964. 572 с.
-

Шмуклер Валерій Самуїлович, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.

ORCID iD: 0000-0000-0000-0000. Тел.: (057) 707-31-07. E-mail: v_shmukler@hotmail.com.

Лугченко Олена Іванівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0001-5397-355X. Тел.: (098) 716-30-30. E-mail: elenalugchenko@gmail.com.

Нажем Алі Хусейн, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0001-7247-4457. Тел.: (073) 217-07-33. E-mail: ali.h.najem@hotmail.com.

Shmukler Valeriy, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Building Structures, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0000-0000-0000. Tel: (057) 707-31-07.

Email: v_shmukler@hotmail.com.

Lugchenko Olena, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Building Structures, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-5397-355X. Tel: (098) 716-30-30.

Email: elenalugchenko@gmail.com.

Nazhem Ali, postgraduate student, Department of Building Structures, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-7247-4457. Tel: (073) 217-07-33. Email: ali.h.najem@hotmail.com.

Статтю прийнято 24.01.2020 р.