

УДК 539.4.01: 004.42

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-12>

АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ БАЛОЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Костіков Олександр Анатолійович,

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-3503-4836

Холодник Юрій Сергійович,

кандидат технічних наук, доцент
ORCID ID: 0009-0009-9803-9328

Сагайда Павло Іванович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-4700-8160

У роботі представлено комп'ютерну програму, призначену для розрахунку на міцність балочних конструкцій з урахуванням нормальних, дотичних та еквівалентних напружень. Основою запропонованого підходу є методика використання безпечних факторних просторів, яка дозволяє підвищити ефективність інженерних розрахунків. Застосування такої методики сприяє спрощенню математичних процедур, зменшенню ймовірності помилок та зниженню тривалості обчислювального процесу.

Програмний продукт має інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс, що робить його доступним як для досвідчених інженерів, так і для студентів, які лише починають вивчення розрахунків на міцність. Апробація програми показала високу точність результатів і зручність у застосуванні під час виконання типових розрахунків балочних конструкцій.

Представлену розробку доцільно застосовувати в освітньому процесі технічних закладів, а також у проєктній діяльності фахівців з будівельної механіки. З огляду на її функціональність і простоту використання програма має потенціал для подальшого розвитку та впровадження в практику комп'ютерного моделювання інженерних конструкцій.

Ключові слова: балки, опорні реакції, епюри поперечних сил та згинальних моментів, міцність.

Kostikov Alexander, Kholodnyak Yurii, Sahaida Pavlo. Automation of strength calculation for beam structures

The paper presents a computer program designed to calculate the strength of beam structures with consideration of normal, tangential, and equivalent stresses. The basis of the proposed approach is the methodology of using safe factor spaces, which allows to increase the efficiency of engineering calculations. The application of this methodology helps to simplify mathematical procedures, reduce the probability of errors and reduce the duration of the computational process.

The software product has an intuitive graphical interface that makes it accessible to both experienced engineers and students who are just starting to study strength calculations. Testing of the program has shown high accuracy of results and ease of use when performing typical calculations of beam structures.

The presented development is advisable to use in the educational process of technical institutions, as well as in the design activities of specialists in structural mechanics. Taking into account its functionality and ease of use, the program has the potential for further development and implementation of computer modeling of engineering structures.

Keywords: beam, bearing reactions, diagrams of shear forces and bending moments, strength.

Вступ. Оскільки балки виконують роль ключових несучих елементів у більшості конструкцій, їх розрахунок на міцність є невід'ємною складовою частиною процесу проєктування інженерних споруд. Необхідність забезпечення безпеки конструкцій, раціонального використання матеріалів і підвищення надійності

в умовах змінного навантаження зумовлює актуальність такого розрахунку.

Через те що розрахунок балок на міцність пов'язаний зі складними інженерними обчисленнями, для його виконання застосовують спеціалізоване програмне забезпечення. Існує широкий спектр таких програмних продуктів,

наприклад SAP2000, ANSYS, ЛІРА-САПР та багато інших.

SAP2000 [1] є універсальним програмним засобом, призначеним для чисельного моделювання та інженерного аналізу просторових конструкцій, зокрема балок, рам і складних структурних систем.

ANSYS [2] – це багатофункціональна система комп'ютерного інженерного аналізу, призначена для чисельного моделювання фізичних процесів у твердих тілах, рідинах і газах. Програмне забезпечення передбачає розв'язання задач механіки деформівного твердого тіла, теплопередачі, гідро- та аеродинаміки, електромагнетизму, а також міждисциплінарного аналізу. Завдяки використанню методу скінченних елементів (FEM), ANSYS дозволяє здійснювати високоточне моделювання напружено-деформованого стану конструкцій, оптимізацію геометрії та параметрів матеріалів, а також прогнозування поведінки об'єктів у складних умовах експлуатації.

ЛІРА-САПР [3] – це багатофункціональний програмний комплекс для чисельного моделювання, аналізу та проєктування будівельних конструкцій різного типу. Програма реалізує метод скінченних елементів і дозволяє виконувати статичний, динамічний, сейсмічний та нелінійний аналіз просторових і плоских систем. ЛІРА-САПР підтримує розрахунок залізобетонних, сталевих, кам'яних і дерев'яних конструкцій, а також взаємодію споруд з основою.

Таким чином, перелічені програми є багатофункціональними, і розрахунок балок на міцність є однією з їх багатьох функцій. Використання цих програм вимагає від користувачів глибокої теоретичної підготовки в області опору матеріалів і теоретичної механіки, а також знання відповідної мови моделювання. Недостатній рівень теоретичних знань у відповідних галузях ускладнює ефективне використання такого програмного забезпечення користувачами з недостатньою теоретичною підготовкою.

Проте в практичних умовах часто виникає потреба у виконанні спрощених розрахунків на міцність, що дозволяють підібрати за сортаментом відповідний номер профілю, здатного витримати задане навантаження. З огляду на це особливої актуальності набуває розроблення інтуїтивно зрозумілого програмного забезпечення для комплексного розрахунку балочних конструкцій, орієнтованого на широкий спектр користувачів.

Метою роботи є розроблення комп'ютерної програми для розрахунку міцності балочних конструкцій на основі спрощеного підходу, що

використовує концепцію безпечних факторних просторів профілів балок.

Для досягнення цієї мети необхідно розробити інтуїтивно-зрозумілий користувацький інтерфейс, який дозволяє користувачу ефективно вводити навантаження, які діють на конструкцію і параметри балки. Крім того, необхідно автоматизувати виконання необхідних розрахунків і візуалізувати результати у вигляді графіків і відповідної текстової інформації.

Реалізації цієї мети та завдань і присвячено роботу.

Методи та методики дослідження. Для розрахунку балок на міцність використовується так звана спрощена методика [4, с. 143]. Сутність цієї методики полягає в тому, що для кожного номеру балочного профілю із сортаменту [5; 6] у системі координат (Q, M) будується область, для всіх точок якої виконуються умови міцності за нормальними, дотичними та еквівалентними напруженнями. Тут Q – поперечна сила, а M – згинальний момент. Ця область є фігурою, яка обмежена осями координат Q і M , прямими $M = [M]$ і $Q = [Q]$ та еліпсом

$$\frac{M^2}{\beta^2} + \frac{Q^2}{\gamma^2} = 1,$$

де

$$\beta = \frac{J_x \cdot [\sigma]}{y_k},$$

$$\gamma = \frac{d \cdot J_x \cdot [\sigma]}{\sqrt{\alpha} \cdot \left(S_x - \frac{1}{2} \cdot d \cdot y_k^2 \right)}.$$

Тут J_x – момент інерції перерізу відносно осі x , $\alpha = 4$ за третьою теорією міцності, $[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу балки на розтягання і стискання, S_x – статичний момент половини перерізу відносно осі x , d – товщина стінки балочного профілю, W_x – момент опору відносно осі x . Значення y_k , наприклад, для двотавра визначається формулою

$$y_k = \frac{h}{2} - t,$$

де h – висота двотавра, t – середня товщина полиці. У цій точці еквівалентне напруження може досягати максимального значення.

$[M]$ і $[Q]$ – це допустимі величини згинального моменту і поперечних сил у перерізах балки, які визначаються за формулами

$$[M] = W_x \cdot [\sigma],$$

$$[Q] = \frac{d \cdot J_x \cdot [\sigma]}{S_x \cdot \sqrt{\alpha}}.$$

Значення h , t , W_x , J_x , S_x для виконання розрахунків беруться із сортаменту.

Область, в якій виконуються всі умови міцності балочних профілів, називається безпечним факторним простором. Безпечний факторний простір показано на рис. 1.

Для розрахунку балок на міцність реалізовано такий алгоритм.

Для заданого навантаження будуються епюри поперечних сил і згинальних моментів. Для перерізів, розташованих вздовж довжини балки з деяким досить малим кроком Δx , визначаємо значення поперечних сил та згинальних моментів, користуючись побудованими епюрами. Для визначених значень (Q_i, M_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ (n – кількість точок вздовж довжини балки) перевіряємо, чи належать ці точки області безпечного факторного простору для першого номеру профіля в сортаменті.

Значення (Q_i, M_i) беруться за модулем. Якщо всі точки не виходять за межі безпечного факторного простору, то заданий номер профілю задовольняє умові міцності за нормальними, дотичними та еквівалентними напруженнями. Якщо хоч одна точка виходить за межі цього простору, беремо наступний профіль із сортаменту, будуюмо для нього відповідний безпечний факторний простір і перевіряємо приналежність точок із координатами (Q_i, M_i) цьому безпечному факторному простору. Алгоритм повторюємо, доки не знайдемо профіль, для якого значення поперечних сил і згинальних моментів для всіх вибраних точок уздовж довжини балки не належать його безпечному факторному простору. Цей профіль і буде задовольняти умовам міцності за нормальними, дотичними та еквівалентними напруженнями.

Результати. Авторами створено комп'ютерну програму для повного розрахунку на

міцність балочних конструкцій, яка є модернізованою версією попередніх розробок, виконаних у середовищі Mathcad [7–9]. На відміну від них, нова програма реалізована мовою програмування Python, що було зумовлено її широкими можливостями для виконання складних математичних обчислень та розроблення графічного інтерфейсу користувача. Застосування бібліотеки Tkinter дало змогу створити зручний і функціональний інтерфейс, який забезпечує повноцінний доступ до всіх опцій програми. Крім того, важливою перевагою є те, що Python – це безкоштовне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом.

Розроблена комп'ютерна програма забезпечує певний функціонал для розрахунку балочних конструкцій. Вона дозволяє візуалізувати схему балки на основі введених користувачем параметрів, автоматично визначати опорні реакції, а також будувати епюри поперечних сил Q та згинальних моментів M . Програма здійснює підбір мінімального номера балочного профілю, який задовольняє вимоги міцності за нормальними, дотичними та еквівалентними напруженнями. Крім того, реалізована побудова безпечного факторного простору в координатах Q – M , що дозволяє аналізувати межі допустимих навантажень. Як профіль можна вибирати двотавровий переріз, швелер, зворотношвелер або прямокутний замкнутий профіль.

З метою демонстрації роботи програмного забезпечення розглянемо конкретний приклад розрахунку балочної конструкції.

Задача. Для консольної балки зі сталі Ст.4пс (рис. 2) визначити опорні реакції, побудувати епюри поперечних сил і згинальних моментів, визначити з умов міцності потрібний номер профілю, розрахувати для нього прогин у точці H і кут повороту перерізу K , побудувати графіки

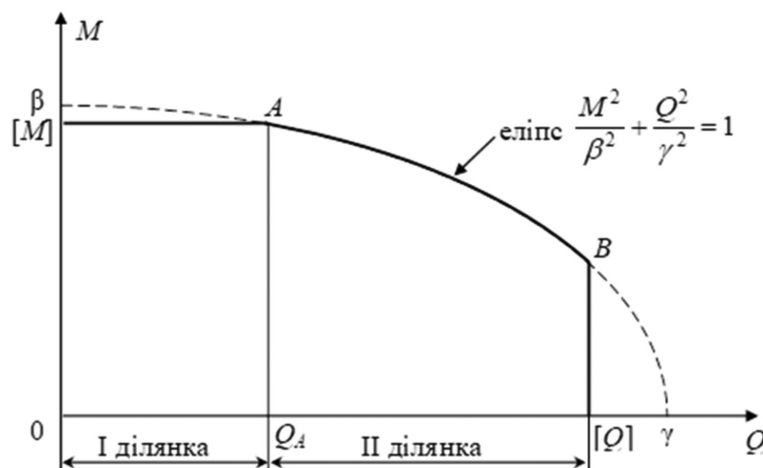


Рис. 1. Безпечний факторний простір

цих переміщень за довжиною балки, якщо її профіль – швелер за ДСТУ 3436–96.

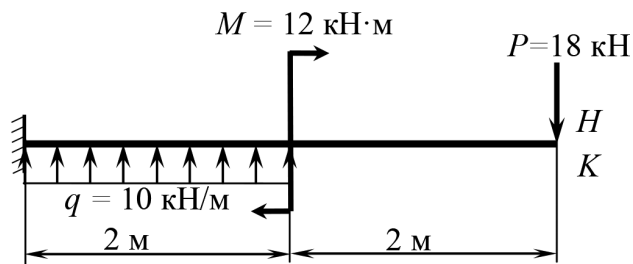


Рис. 2. Схема навантаження та закріплення балки

Рішення:

1) У меню «Початкові дані» головного вікна програми виберіть пункт «Введення даних». У вікні, що з'явилося, введіть такі параметри: довжину балки, величину згинального моменту

та точку його прикладання, зосереджену силу з відповідною точкою прикладання, а також рівномірне навантаження, вказавши його початкову точку та довжину. Після цього натисніть кнопку «Зберегти», а потім – «Додати момент», «Додати силу», «Додати навантаження». Ви можете внести будь-яку кількість навантажень (моментів, зосереджених сил, рівномірних навантажень). Усі введені навантаження відображаються у відповідному списку (рис. 3);

2) Для того щоб отримати схему балки, яка відповідає введеним даним, натисніть на кнопку «Показати балку» в головному меню програми (рис. 4). У результаті з'явиться схема балки, побудована на основі введених даних. Це зроблено для того, щоб користувач перевіряв правильність введених опор і навантажень балки.

3) У меню «Розрахунки» виберіть пункт «Епюри» для побудови епюр поперечних сил

Введення даних

Додайте потрібні навантаження

Згинальний момент (кН·м)
12 Додати момент

та точка с(м) його прикладання
2 Видалити момент

Зосереджена сила P(кН)
-18 Додати силу

та точкат d(м) її прикладання
4 Delete

Рівномірне навантаження q(кН/м)
10 Додати навантаження

його початок a(м) та довжина
0.0 Delete

b(м) його прикладання
2 Delete all

Введені дані

Дані	Величина	Прикладання	Довжина
Момент	12.0	2.0	0
Сила	-18.0	4.0	0
Навантаження	10.0	0.0	2.0

Видалити

Рис. 3. Введення початкових даних для розв'язання задачі

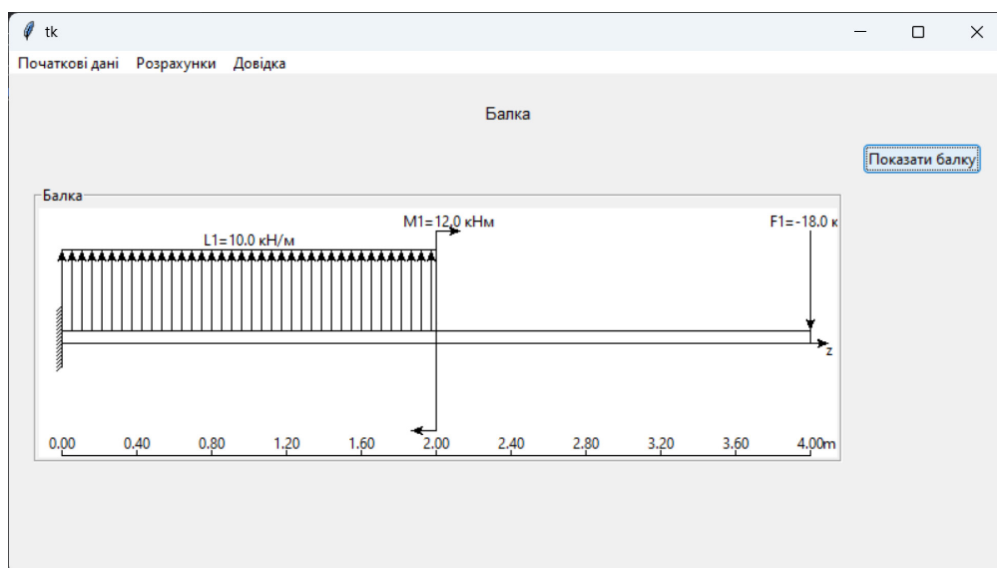


Рис. 4. Схема балки, побудована за даними користувача

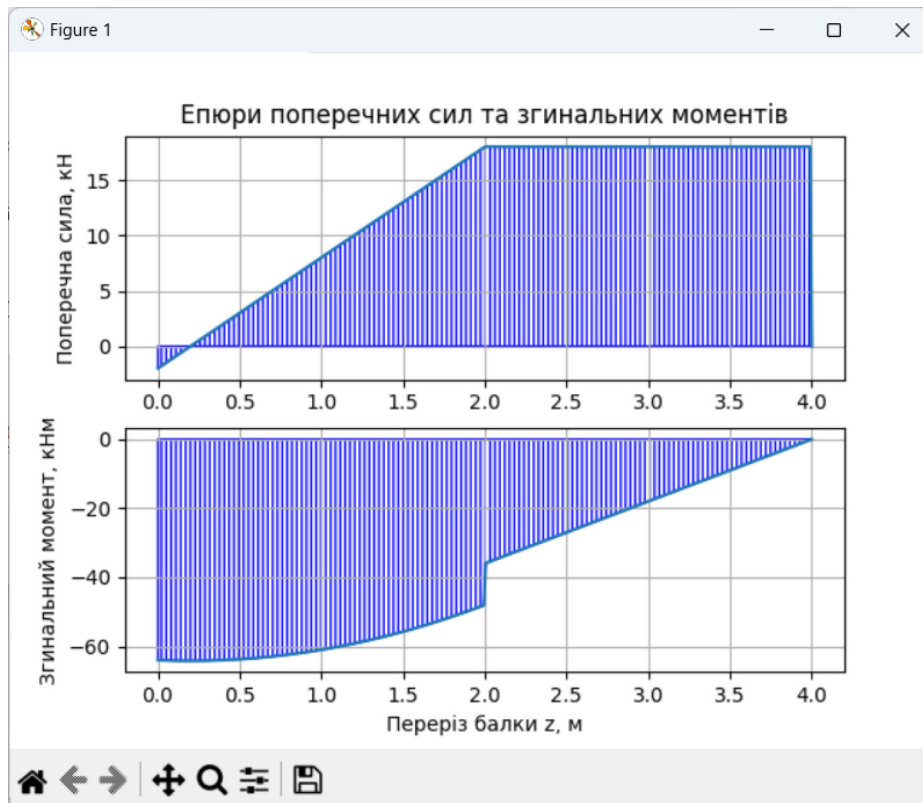


Рис. 5. Епюри поперечних сил та згинальних моментів

і згинальних моментів. Результати розрахунку наведено на рис. 5.

4) У меню «Розрахунки» виберіть пункт «Номер профілю» для визначення мінімального номера швелера, який відповідає умовам міцності за нормальними, дотичними та еквівалентними напруженнями. Результати розрахунку наведено на рис. 6.

5) У меню «Розрахунки» виберіть пункт «Безпечний факторний простір» для побудови допустимої області напружень профілю, що відповідає умовам міцності за нормальними, дотичними та еквівалентними напруженнями (див. рис. 7). На рис. 7 точками позначено координати (Q, M) у характерних перерізах балки. Згідно зі спрощеною методикою, якщо всі точки (Q, M) перебувають у межах побудованого безпечного

факторного простору, то вибраний профіль вважається таким, що задовольняє умови міцності за всіма розглянутими критеріями.

6) У меню «Розрахунки» виберіть пункт «Порівняння з попереднім номером профілю» для перевірки того, що вибраний номер швелера є мінімальним із тих, що задовольняють умовам міцності за нормальними, дотичними та еквівалентними напруженнями (рис. 8). Як показано на рис. 8, для попереднього номера профілю за ДСТУ 3436-96 в окремих перерізах балки координати поперечної сили та згинального моменту (Q, M) виходять за межі безпечного факторного простору. Це підтверджує, що вибраний номер є мінімально допустимим. Вибір цього номеру сприяє раціональному використанню матеріалу.

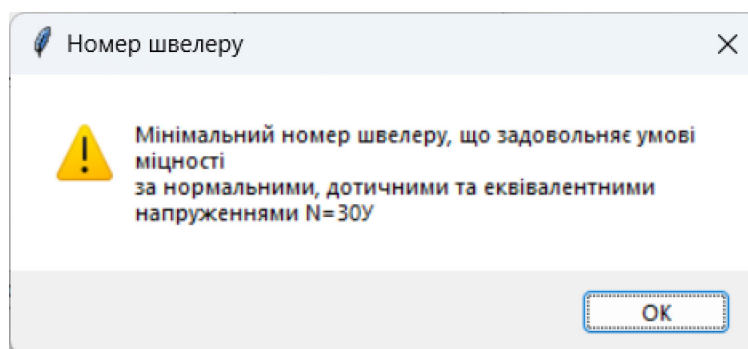


Рис. 6. Визначений номер швелеру



Рис. 7. Безпечний факторний простір знайденого профілю

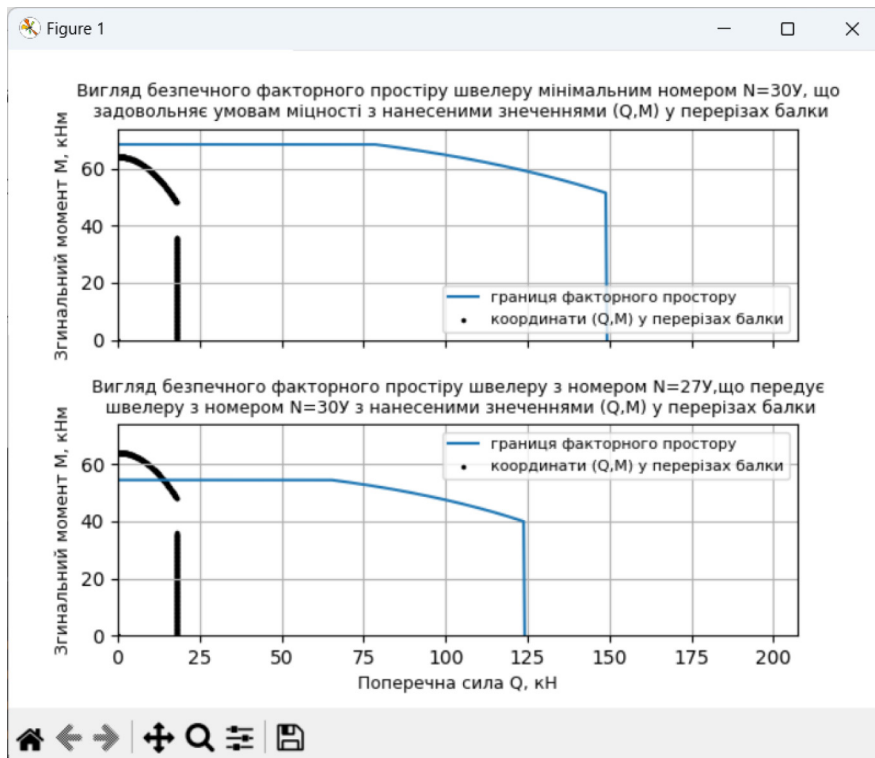


Рис. 8. Порівняння з попереднім номером швелеру

7) Щоб визначити прогин балки в конкретній точці, слід вибрати пункт меню «Прогин у заданій точці». Після цього відкриється діалогове вікно, в якому необхідно ввести координату або номер перерізу балки. Натиснувши кнопку «ОК» після введення координати, користувач

отримає нове діалогове вікно з результатами обчислення прогину для вказаного перерізу (рис. 9).

8) Для обчислення кута повороту перерізу балки в заданій точці слід вибрати пункт меню «Кут повороту в заданій точці». У діалоговому

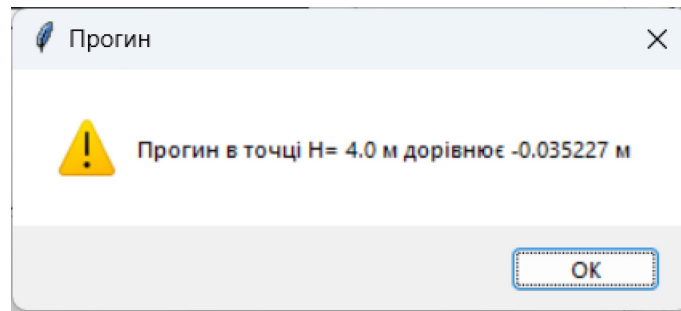


Рис. 9. Визначення прогину в заданій точці

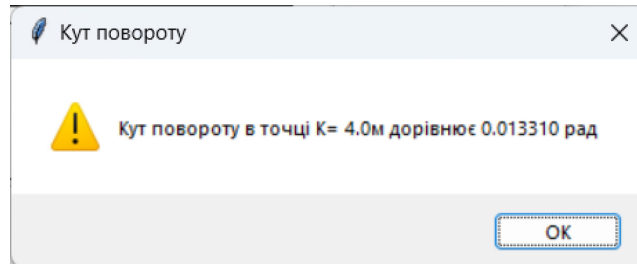


Рис. 10. Визначення кута повороту перерізу балки в заданій точці

вікні необхідно вказати положення перерізу балки, після підтвердження вводу буде відображено обчислене значення кута повороту для вибраного перерізу (рис. 10).

9) Для побудови графіків залежності прогину та кута повороту балки від положення її перерізу слід вибрати пункт меню «Епюри одиничних сил та згинальних моментів». У результаті буде побудовано графік зміни цих величин уздовж довжини балки (рис. 11).

Така задача була розв'язана аналітично і за допомогою системи Mathcad у роботі [10, с. 118]. Отримані результати збігаються з розрахунками, наведеними в цій роботі.

Таким чином, у результаті було автоматизовано розрахунки на міцність балочних конструкцій для різних типів профілів і балок за допомогою розробленої комп'ютерної програми. Користування програмою не вимагає глибоких теоретичних знань в області опору

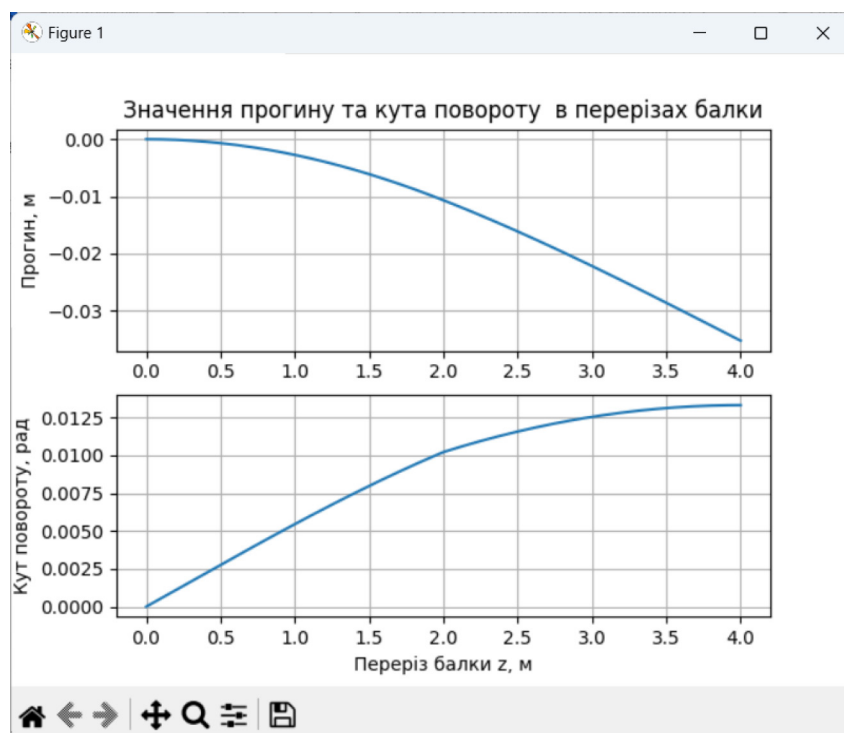


Рис. 11. Значення прогину і кута повороту в перерізах балки

матеріалів і теоретичної механіки і доступно широкому колу користувачів. Програма використовує вільно розповсюджене програмне забезпечення і не потребує ліцензії. Розрахунки балок на міцність мають велике значення для забезпечення безпеки, довговічності та ефективності будь-якої будівельної конструкції. Вони дозволяють визначити, чи витримає балка задане навантаження без перевищення допустимих напружень, забезпечити вибір мінімально необхідного номеру профілю, що знижує витрати на матеріали, передбачити прогини та кути повороту, які можуть вплинути на експлуатаційні характеристики конструкції. Надалі планується автоматизувати розрахунки на міцність рам і ферм.

Висновки. Розроблено комп'ютерну програму для розрахунку на міцність балочних конструкцій з урахуванням нормальних, дотичних та еквівалентних напружень. Основою методики є використання безпечних факторних просторів, що суттєво спрощує та пришвидшує обчислювальний процес.

Розроблений програмний продукт вирізняється простотою у використанні та має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що робить його зручним для широкого кола користувачів.

Програму можна рекомендувати для використання як фахівцями в галузі проектування та інженерії, так і студентами технічних спеціальностей – і в освітньому процесі, й у практичних розрахунках.

ЛІТЕРАТУРА:

1. SAP2000 | STRUCTURAL ANALYSIS AND DESIGN. *Structural Engineering Software / Computers and Structures, Inc.* URL: <https://www.csiamerica.com/products/sap2000> (date of access: 30.06.2025).
2. ANSYS. *ANSYS Engineering Simulation Software*. URL: <https://www.ansys.com/>
3. Програми для розрахунку та проектування конструкцій. URL: <https://www.liraland.ua/> (дата звернення: 30.06.2025).
4. Холодняк Ю. С., Костіков О. А., Чоста Н. В. Опір матеріалів : курс лекцій для студентів усіх механічних спеціальностей денної і заочної прискорених форм навчання. Краматорськ : ДДМА, 2023. 259 с.
5. ДСТУ 8768:2018. ДСТУ 8768:2018 Двотаври сталеві гарячекатані. Сортамент. На заміну ГОСТ 8239-89 ; чинний від 2019-01-01. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2018. 8 с.
6. ДСТУ 3436-96. ДСТУ 3436-96 Швелери сталеві гарячекатані. Сортамент. На заміну ГОСТ 8240-89 ; чинний від 1999-01-01. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1996. 20 с.
7. Про комп'ютерні програми до спрощеної методики комплексної оцінки міцності двотаврових балок / Ю. С. Холодняк та ін. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2019. № 3 (47). С. 72–81.
8. Kholodnyak Yu., Kostikov A., Podlesny S. et al. About Computer Programs for Simplified Methodology of Complex Assessment of Strength of Two-beam Beams. *Перспективні технології та прилади*. 2019. № 15. С. 99–108. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-15> (date of access: 15.10.2024).
9. Розвиток комп'ютерних програм спрощеного розрахунку на міцність двотаврових балок / Ю. С. Холодняк та ін. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2020. № 1(48). С. 117–126.
10. Автоматизація розрахунків в інженерній практиці : навчальний посібник / Ю. С. Холодняк та ін. ; ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка». Одеса : Олді+, 2025. 160 с. URL: <https://dspace.mipolytech.education/items/77a8a5f2-ed56-4f6e-b7b7-d2edd4e965be>

REFERENCES:

1. SAP2000 / STRUCTURAL ANALYSIS AND DESIGN. *Structural Engineering Software / Computers and Structures, Inc.* Retrieved from <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>.
2. ANSYS. *ANSYS Engineering Simulation Software*. Retrieved from <https://www.ansys.com/>
3. Prohramy dlia rozrakhunku ta proektuvannia konstrukttsii [Programs for calculating and designing structures.]. Prohramy dlia rozrakhunku ta proektuvannia konstrukttsii [Programs for calculating and designing structures.]. <https://www.liraland.ua/> [in Ukrainian].
4. Kholodniak, Yu., Kostikov, O., & Chosta, N. (2023). Opir materialiv : kurs lektsii dlia studentiv usikh mekhanichnykh spetsialnostei dennoi i zaachnoi pryskorenykh form navchannia [Strength of materials : a course of lectures for students of all mechanical specialties of full-time and part-time accelerated forms of education]. DDMA. [in Ukrainian].
5. UkrDNTTs "Enerhostal". (2018). DSTU 8768:2018 Dvotavry stalevi hariachekatani. Sortament [Hot-rolled steel I-beams. Product range] (DSTU 8768:2018). Derzhstandart Ukrainy. [in Ukrainian].
6. Ukrainskyi naukovo-doslidnyi instytut metaliv "UkrNDIMet". (1996). DSTU 3436-96 Shvelery stalevi hariachekatani. Sortament [Hot-rolled steel channels. Product range] (DSTU 3436-96). Derzhstandart Ukrainy. [in Ukrainian].

7. Kholodniak, Yu. S., Kostikov, A. A., Podliesnyi, S. V., & Kaporovich, S. V. (2019). Pro kompiuterni prohramy do sproshchenoi metodyky kompleksnoi otsinky mitsnosti dvotavrovykh balok [On computer programs for a simplified methodology for comprehensive strength assessment of I-beams]. *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii*, 3 (47), 72–81. [in Ukrainian].
8. Kholodnyak, Yu., Kostikov, A., Podlesny, S. et al. (2019). About Computer Programs for Simplified Methodology of Complex Assessment of Strength of Two-beam Beams. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, (15), 99–108. <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-15/>. [in Ukrainian].
9. Kholodniak, Yu. S., Kostikov, A. A., Podliesnyi, S. V., & Kaporovich, S. V. (2020). Rozvytok kompiuternykh prohram sproshchenoho rozrakhunku na mitsnist dvotavrovykh balok [Development of computer programs for simplified strength calculation of I-beams]. *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii*, 1(48), 117–126. [in Ukrainian].
10. Kholodniak, Yu., Kostikov, O., Sahaida, P., & Kasianiuk, O. (2025). Avtomatyzatsiia rozrakhunkiv v inzheneranii praktytsi : navchalnyi posibnyk [Automation of calculations in engineering practice : a textbook]. Oldi+. [in Ukrainian].