

ОНЛАЙН МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРАХУНКУ КАНАЛІВ ГІДРАВЛІЧНО НАЙВИГІДНІШОГО ПЕРЕРІЗУ

Юрій Копаниця¹, Олена Гіжа², Оксана Нечипор³,
Олександр Голобородько⁴, Андрій Гаврилюк⁵

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, пр. Повітряних сил, м. Київ, Україна, 03037

¹ канд. тех. наук., kopanytsia.iud@knuba.edu.ua, orcid.org//0000-0002-9470-1902

² канд. тех. наук., gizha.oo@knuba.edu.ua, orcid.org//0000-0003-4878-6850

³ канд. тех. наук., nechypor.om@knuba.edu.ua, orcid.org//0000-0001-8635-2231

⁴ holoborodko_ov-2022@knuba.edu.ua, orcid.org//0009-0005-4161-2948

⁵ havryliuk_av-2022@knuba.edu.ua, orcid.org//0009-0004-6804-9334

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.49.4-16

Анотація. Питання про визначення глибини рівномірного руху є складовою частиною багатьох гідравлічних розрахунків відкритих русел і різноманітних гідротехнічних споруд. Її необхідно знати при побудові кривих вільної поверхні, визначенні їхньої довжини, дослідженні форм спряження б'єфів.

Для існування рівномірного руху необхідно виконання цілого ряду умов: русло має бути призматичним, шорсткість дна і стінок русла повинні залишатися незмінними, похил дна русла має бути додатним ($i > 0$). Незмінною буде і глибина вздовж потоку.

В роботі представлено програму онлайн розрахунку та моделювання параметрів русла трапецеїдального перерізу гідравлічно найвигіднішої форми, яка включає клієнтську й серверну частини. Програму реалізовано за CGI технологією [5-9] на мові PERL за посиланням <https://www.k123.org.ua/jeh4.html>. Захист доступу до коду програми та фільтрація й аналіз коректного вводу вихідних даних реалізовано за допомогою регулярних виразів. Програму розроблено із урахуванням сучасних вимог до мобільної розробки: мінімізація об'єму коду та компактний формат відображення статичної та динамічної інформації, графічний виведення представлено у векторному форматі SVG.

Ключові слова: гідравлічно найвигідніший переріз, CAS MAXIMA, чисельні методи, онлайн розрахунок, веб форма, клієнт-серверна програма, моделювання.

ВСТУП

Рух рідини у відкритих руслах характеризується наявністю вільної поверхні (при цьому змочений периметр є частиною загального периметра живого перерізу).

Для існування рівномірного руху необхідно виконання цілого ряду умов: русло має бути призматичним, шорсткість дна і стінок русла повинні залишатися незмінними, похил дна русла має бути додатним

($i > 0$). Незмінною зберігається і глибина вздовж потоку.

Питання про визначення глибини рівномірного руху є складовою частиною багатьох гідравлічних розрахунків відкритих русел і різноманітних гідротехнічних споруд. Також її необхідно знати при побудові кривих вільної поверхні, визначенні їхньої довжини, дослідженні форм спряження б'єфів.

При проектуванні нових каналів можуть бути задані: коефіцієнт закладання укосів m , витрата Q , коефіцієнт шорсткості дна і стінок русла n , похил дна русла i .

Виходячи з цих даних слід запроектувати поперечний профіль каналу, тобто знайти його розміри: ширину b і глибину h_0 .

Така задача може мати декілька розв'язань, тобто можна запропонувати цілий ряд різних поперечних профілів каналу, що відповідають даним умовам. Але серед цих варіантів є такий, для якого середня швидкість V_{\max} буде максимальною, і, відповідно, площа перерізу буде мінімальною ω_{\min} . Поперечний переріз, що задовольняє цим умовам, і є гідравлічно найвигіднішим. З будівельної точки зору канали з гідравлічно найвигіднішим профілем потребують найменших витрат на будівництво, а ефект досягнення заданої пропускної здатності є максимальним.

В літературі з гідравліки [1, 2, 3] гідравлічно найвигідніший переріз трапецеїдальних русел характеризується відношенням ширини каналу по дну b до глибини води в каналі h_0 , тобто

$$\beta_{г.н.} = \left(\frac{b}{h_0} \right)_{г.н.} . \quad (1)$$

Цей коефіцієнт $\beta_{г.н.}$ також можна обчислювати в залежності від коефіцієнта закладання укосів m

$$\beta_{г.н.} = 2(\sqrt{1+m^2} - m). \quad (2)$$

Аналізуючи співвідношення (2), приходимо до висновку, що для каналів прямокутного профілю при $m = 0$ $\beta_{г.н.} = 2$. Тобто, для прямокутного русла при гідравлічно найвигіднішому перерізі $h_0 = \frac{b}{2}$.

Для трапецеїдальних каналів значення $\beta_{г.н.}$, в залежності від коефіцієнта закладання укосів m , наведені в табл.1. Значення коефіцієнта $\beta_{г.н.}$ в залежності від коефіцієнта закладання укосів m .

Табл.1

m	$\beta_{г.н.}$
0 (прямокутний переріз)	2,0
1,0	0,828
1,5	0,6056
2,0	0,472
2,5	0,385

Витрата води в каналах при рівномірному русі знаходяться за формулою

$$Q = \omega C \sqrt{R \cdot i}, \quad (3)$$

де: R – гідравлічний радіус; i – похил дна русла; ω – площа живого перерізу; $\omega = (b + mh_0)h_0$; χ – змочений периметр

$$\chi = b + 2h_0 \sqrt{1 + m^2},$$

C – коефіцієнт Шезі;

$$C = \frac{1}{n} R^y,$$

n – коефіцієнт шорсткості поверхні русла; y – показник ступеня, який у формулі Форхгеймера дорівнює $\frac{1}{5}$, а у формулі Маннінга $\frac{1}{6}$.

Швидкість руху води в каналі визначається за залежністю

$$V = C \sqrt{Ri}, \quad (4)$$

або за формулою

$$V = W \sqrt{i},$$

де $W = C \sqrt{R}$ – швидкісна характеристика

$$W = \frac{1}{n} R^y R^{0,5} = \frac{1}{n} R^z, \quad (5)$$

$z = y + 0,5$ – показник ступеня, який підраховується за формулою М.М. Павловського

$$z = 0,37 + 2,5\sqrt{n} - 0,75(\sqrt{n} - 0,1)\sqrt{R}. \quad (6)$$

Тепер, з урахуванням (4) та (5) залежність /3/ набуде вигляду

$$Q = \omega W \sqrt{i}. \quad (7)$$

Це рівняння є ключовим для знаходження значень елементів русла трапецеїдального перерізу гідравлічно найвигіднішої форми. В це рівняння входить дві невідомі величини: ширина каналу по дну b і глибина наповнення каналу h_0 .

Основні геометричні елементи трапецеїдального русла показані на рис. 1.

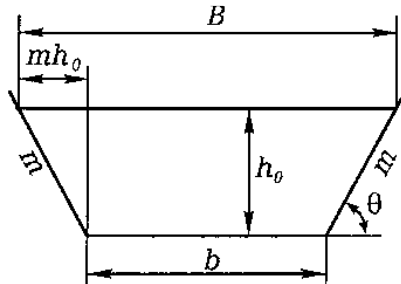


Рис. 1. Основні елементи русла трапецеїдального перерізу

Fig. 1. The main elements of a trapezoidal cross-section channel

Слід зазначити, що коефіцієнт закладання укосів m вважаємо відомою величиною, тому що m залежить від типу ґрунту, в якому прокладається траса каналу, а це значення наводиться в спеціальних довідниках [2].

В зв'язку з тим, що в рівняння (7) входить дві невідомі величини b та h_0 , як на це вказувалося вище, то воно вирішується методом підбору.

Алгоритм необхідних розрахунків і їх послідовність показані нижче (див. рис. 2).

Приклад. Визначити розміри трапецеїдального каналу гідравлічно найвигіднішого перерізу для пропуску витрати

$$Q = 2,0 \frac{\text{М}^3}{\text{с}}$$

Відкоси і дно каналу укріплені облицюванням з тесаного каменю ($n = 0,015$) [2], похил дна русла $i = 0,003$.

В залежності від типу ґрунту приймаємо рекомендований коефіцієнт закладання укосів $m = 1,5$.

За табл.1 або за формулою (2) знаходимо $\beta_{г.н.} = 0,6056$. Між глибиною і шириною

$$\text{русла існує залежність } \beta_{г.н.} = \frac{b}{h_0} = 0,6056.$$

Подальші розрахунки проводимо в табличній формі (табл. 2). Задаючись різними значеннями h_0 , знаходимо поступово витрати Q , які буде пропускати канал при

цих глибинах і порівнюємо їх із заданою

$$Q = 2,0 \frac{\text{М}^3}{\text{с}}$$

За даними розрахунків, наведених у таблиці 2, можна побудувати графік $Q = f(h_0)$.

Таким чином, згідно із розрахунками, витраті

$$Q = 2,0 \frac{\text{М}^3}{\text{с}}$$

відповідає глибина $h_0 = 0,72\text{м}$, а при такій глибині ширина каналу по дну становитиме:

$$b = h_0 \cdot \beta_{г.н.} = 0,72 \cdot 0,6056 = 0,436\text{м}.$$

Табл.2

h_0	$b = h_0 \cdot \beta_{г.н.}$	ω	χ	$R = \frac{\omega}{\chi}$	z	$W = \frac{1}{n} R^z$	$V = W \sqrt{i}$	$Q = \omega \cdot W \sqrt{i}$
0,2	0,121	0,0842	0,721	0,1168	0,670	15,802	0,8655	0,0729
0,4	0,2422	0,0337	1,6844	0,200	0,669	22,725	1,2447	0,0419
0,6	0,3634	0,758	2,5267	0,300	0,667	29,864	1,6356	1,240
0,8	0,4845	1,348	3,369	0,400	0,667	36,231	1,9844	2,674
0,72	0,436	1,0915	3,032	0,360	0,666	33,757	1,8489	2,018

МЕТА І МЕТОДИ

В роботі представлено програму онлайн розрахунку та моделювання параметрів русла трапецеїдального перерізу гідравлічно найвигіднішої форми, яка включає клієнтську й серверну частини, які реалізовано за CGI технологією [5-9] на мові PERL за посиланням <https://www.k123.org.ua/jeh4.html>. Захист доступу до коду програми та фільтрація й аналіз коректного вводу вихідних даних реалізовано за допомогою регулярних виразів (*Regex*) мови *PERL*. Програму реалізовано із урахуванням сучасних вимог до мобільної розробки: мінімізація об'єму коду та компактний формат відображення статичної та динамічної інформації, графічний вивод представлено у векторному форматі *SVG*.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Статична (далі *frontend*) сторінка включає: блок загальної постановки задачі, приклад завдання й схему каналу, довідкову інформацію у компактному згорнутому форматі із використанням іконографіки, алгоритм й формули ітераційного розрахунку, посилання на довідку в аудіо-форматі, приклад реалізації графічного вирішення задачі й веб форму інтерактивного вводу вихідних даних для розрахунку й моделювання параметрів русла. Скріншот елементів умови задачі та іконографіка посилань на довідкову інформацію у згорнутому стані представлено на рис. 2.

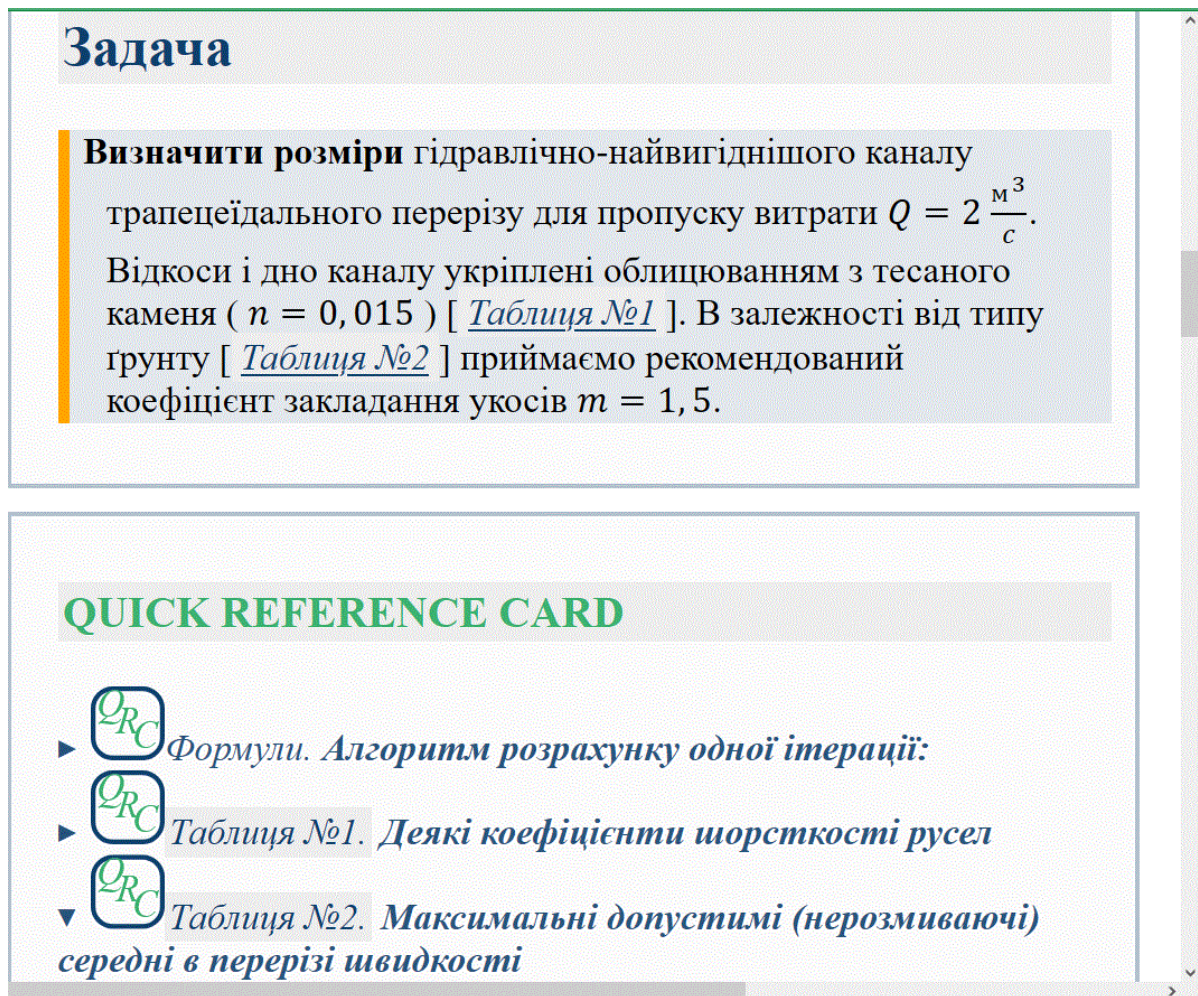


Рис. 2. Скріншот елементів екрану *frontend* сторінки із умовою задачі та іконо графіка посилання на довідкову інформацію

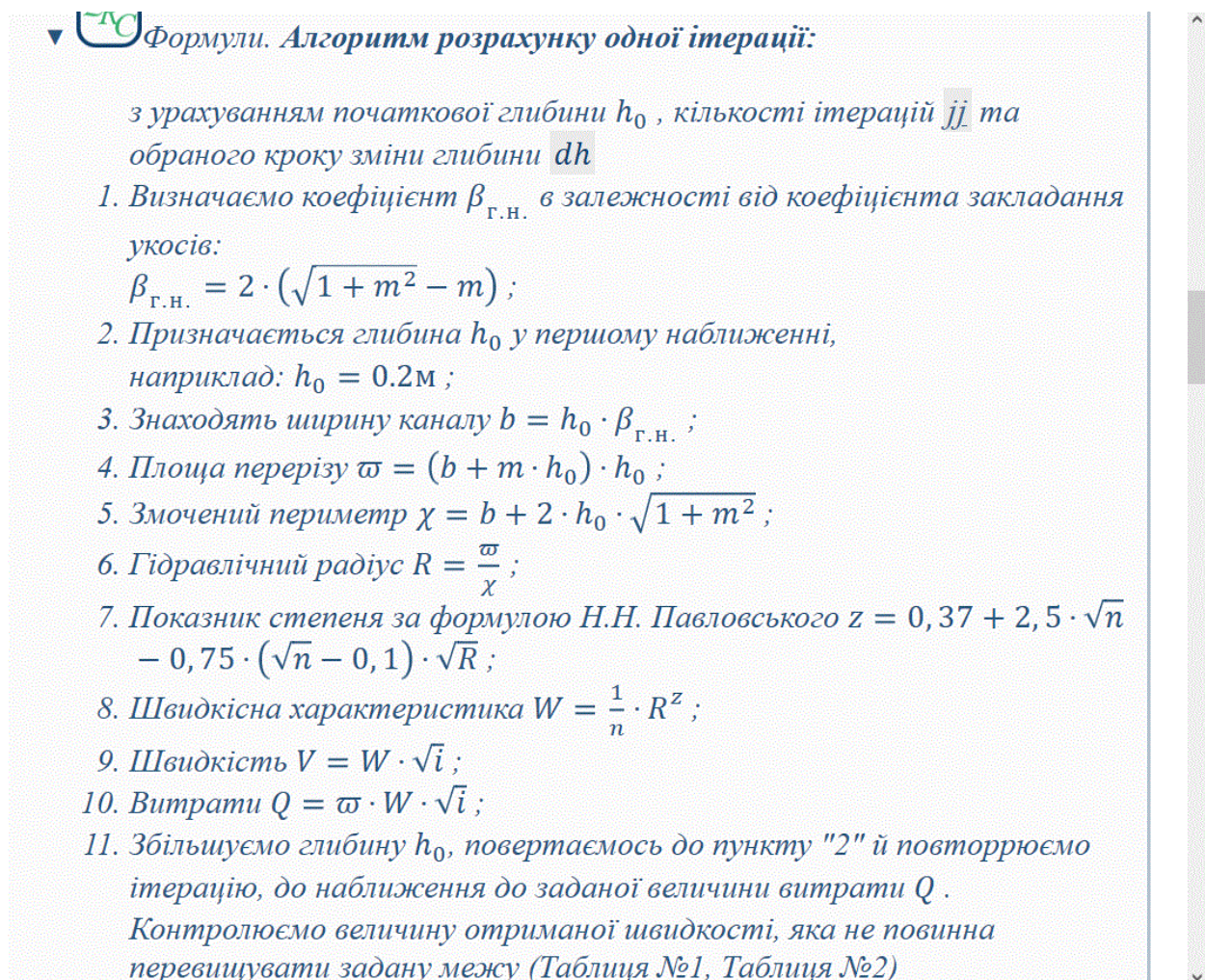
Fig. 2. Screenshot of the frontend screen elements of the page with the task condition and the iconography of the link to the reference information


Алгоритм розрахунку та довідкова інформація у форматі картки (далі *QRC* – *quick reference card*), яка розкривається при натисканні на іконку. Використано технологію так звані «жалюзі» – у такий спосіб програму адаптовано для екранів мобільних пристроїв – компактне стисле представлення максимального об'єму інформації на одному екрані без необхідності прогортання (свайпу). На рис. 3 представлено скріншот екрану першої розкритої довідкової карти із розрахунковими формулами й алгоритмом

розрахунку завдання в межах однієї типової ітерації.

Скріншоти елементів довідкової інформації, яка розміщена на інших *QRC* представлено на рис. 4 та 5.

З метою розширеного тестування мобільних онлайн технологій у навчальному процесі на сторінку включено посилання на умову задачі, алгоритм й послідовність розрахунку у форматі аудіо (рис. 6).




▼  **Формули. Алгоритм розрахунку одної ітерації:**

з урахуванням початкової глибини h_0 , кількості ітерацій jj та обраного кроку зміни глибини dh

1. Визначаємо коефіцієнт $\beta_{г.н.}$ в залежності від коефіцієнта закладання укосів:
$$\beta_{г.н.} = 2 \cdot (\sqrt{1 + m^2} - m) ;$$
2. Призначається глибина h_0 у першому наближенні, наприклад: $h_0 = 0.2\text{м}$;
3. Знаходять ширину каналу $b = h_0 \cdot \beta_{г.н.}$;
4. Площа перерізу $\varpi = (b + m \cdot h_0) \cdot h_0$;
5. Змочений периметр $\chi = b + 2 \cdot h_0 \cdot \sqrt{1 + m^2}$;
6. Гідравлічний радіус $R = \frac{\varpi}{\chi}$;
7. Показник степеня за формулою Н.Н. Павловського $z = 0,37 + 2,5 \cdot \sqrt{n} - 0,75 \cdot (\sqrt{n} - 0,1) \cdot \sqrt{R}$;
8. Швидкісна характеристика $W = \frac{1}{n} \cdot R^z$;
9. Швидкість $V = W \cdot \sqrt{i}$;
10. Витрати $Q = \varpi \cdot W \cdot \sqrt{i}$;
11. Збільшуємо глибину h_0 , повертаємось до пункту "2" й повторюємо ітерацію, до наближення до заданої величини витрати Q .
Контролюємо величину отриманої швидкості, яка не повинна перевищувати задану межу (Таблиця №1, Таблиця №2)

Рис. 3. Скріншот екрану статичної сторінки із алгоритмом та формулами задачі

Fig. 3. Screenshot of the screen of the static page with the algorithm and formulas of the problem


▼  Таблиця №1. Деякі коефіцієнти шорсткості русел

за умовою обраного русла з штучним кріпленням обираємо відповідне значення n

Русла зі штучним кріпленням	Коеф. шорст.
Чисті (нові) гончарні, чавунні та сталеві труби, добре укладені та з'єднані, добре стругані дошки	0.011
Дуже хороше бетонування; нестругані добре пригнані поздовжньо розташовані дошки; водопровідні труби у нормальних умовах; вельми чисті водостічні труби	0.012

Рис. 4. Скріншот екрану статичної сторінки із елементами інформації другої довідкової карти

Fig. 4. A screenshot of a static page with elements of help information

▼  Таблиця №2. Максимальні допустимі (нерозмиваючі) середні в перерізі швидкості

за умовою утримання швидкості руху в межах допустимих величин обираємо відповідні ґрунти неукріплених русел або додаткові типи кріплення $V_{\text{доп}}$ та h

Найменування ґрунтів неукріплених русел або типу кріплення	Глибина потоку h , м			
	0.4	1	2	3
	$V_{\text{доп}}$, м/с			
Зв'язкові ґрунти				
Глина середньої щільності	0.7	0.9	1	1.1
Глина щільна	1	1.2	1.4	1.5
Суглинки худі середньощільні	0.7	0.8	0.9	1.0
Суглинки середньої щільності	1.0	1.2	1.4	1.5

Рис. 5. Скріншот екрану статичної сторінки із елементами інформації третьої довідкової карти

Fig. 5. A screenshot of a static page with elements of help information

Умова задачі (аудіо) :

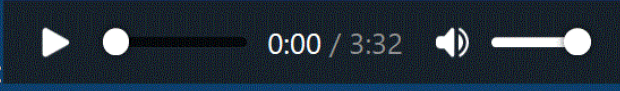


Рис. 6. Скріншот екрану статичної сторінки із елементами графіки та аудіо

Fig. 6. A screenshot of a static page with graphics and audio elements

ПРИКЛАД РЕАЛІЗАЦІЇ МОБІЛЬНОГО УНІВЕРСАЛЬНОГО ВЕБ-ІНТЕРФЕЙСУ ТА ОН-ЛАЙН РОЗРАХУНКІВ

На головній сторінці також наведено приклад графічного вирішення поставленої задачі. Аналогічні графіки, які генеруються програмним кодом серверної частини програми за вихідними даними онлайн форми вводу даних буде наведено далі.

Веб форма вводу вихідних параметрів із заповненими прикладами даних (по замовчанню) та рекомендаціями щодо розмірності й порядку величин представлено на рис. 7. Форма вводу має – аналогічну прийнятій у програмі CAS MAXIMA – американську нотацію вводу числових даних із відокремленням десятинних розрядів символом «крапка».

Форма вводу даних:

Десятинні розряди відокремлено крапкою. Наприклад, 4.5 (4,5)

Нульове значення (θ , $\theta\cdot\theta$, $-\theta$) не вводимо. Нульове значення представляємо малим числом. Наприклад 0.000000001

Коефіцієнт закладання укосів $m = 1.5$ (1 to 4 characters):

Витрата $Q = 2.0 \frac{m^3}{s}$ (1 to 4 characters):

Коефіцієнт шорсткості дна і стінок русла $n = 0.015$ (1 to 7 characters):

Похил дна русла $i = 0.003$ (1 to 7 characters):

Максимальна середня швидкість $V_{max} = 1.15 \frac{m}{s}$ (1 to 4 characters):

Початкова глибина $h_0 = 0.2 m$ (1 to 4 characters):

Крок зміни глибини $dh = 0.2 m$ (1 to 4 characters):

Кількість ітерацій розрахунку $jj = 10$ (1 to 4 characters):

Рис. 7. Скріншот екрану статичної сторінки із онлайн формою вводу даних
Fig. 7. A screenshot of a static page with an online data entry form

На рис. 8 представлено скріншот частини екрану динамічної – згенерованої на сервері сторінки із проміжними результатами ітераційних розрахунків. Для кожної ітерації реалізована програмна перевірка й автоматично кольором позначаються перевищення заданої за умовою величини ви-

трати “ Q ” та відповідна наявність перевищення допустимої максимальної швидкості потоку “ V ”.

Мета розробки серверної онлайн технології розрахунку навчальної задачі із інтерактивною веб формою вводу даних – впровадження у навчальний процес елеме-

нтів комп'ютерного розрахунку та елементів моделювання в системах комп'ютерної алгебри. Роботу виконано на прикладі використання відкритого програмного продукту – CAS MAXIMA. На рис. 8 представлено результати окремих покрокових ітераційних розрахунків та додаткове інформа-

ційне бокове поле із набором формул всього ітераційного циклу. У такий спосіб ми маємо всю необхідну інформацію на екрані мобільного гаджета й можливість паралельно проводити налагодження власного програмного коду в середовищі CAS MAXIMA на локальному комп'ютері.

n	h	b	w	Xi	R	z	W	Q	V	Rel%
0	0.2	0.12111	0.08422	0.84222	0.09999	0.67085	14.22501	0.06561	0.7791	96.7195
1	0.4	0.24222	0.33688	1.68444	0.19999	0.66864	22.72708	0.41934	1.24476	79.033
2	0.6	0.36333	0.75799	2.52666	0.29999	0.66695	29.86569	1.23989	1.63574	38.0055
3	0.8	0.48444	1.34755	3.36888	0.39999	0.66552	36.23008	2.67397	1.98432	-33.69849
4	1	0.60555	2.10555	4.2111	0.49999	0.66426	42.06726	4.85123	2.30402	-142.56149
5	1.2	0.72666	3.03199	5.05332	0.59999	0.66312	47.51099	7.88978	2.60217	-294.48899

Рис. 8. Скріншот екрану динамічної сторінки із результатами частини ітераційних розрахунків

Fig. 8. Screenshot of part of the screen of the dynamic page with the results of iterative calculations

Миттєві інтерактивні клієнт-серверні програмні ітераційні розрахунки й генерація та виведення всіх проміжних елементів на широкому діапазоні вихідних даних дозволяють проводити налагодження власного програмного коду на локальному комп'ютері в системі комп'ютерної алгебри, перевіряти власні розрахунки, моделювати канали гідравлічно найвигіднішого профілю трапецеїдальної форми.

Ми маємо представити багатоваріантний підхід у підготовці сучасних інженерів на прикладі запропонованої навчальної задачі. Система комп'ютерної математики дозволяє розширити інженерні методи розрахунку задач за допомогою графічної системи програми [10-18]. Альтернативний варіант вирішення задачі – задіяти візуалізацію функціональних залежностей, які описують

вищеозначений ітераційний процес розрахунку.

Використання окремих розрахункових формул у складі ітераційного циклу, які представлено на рисунку 3, та можливості простого об'єднання їх у єдину загальну функціональну залежність дозволяє використати просту й наочну графічну візуалізацію вирішення задачі. В системах комп'ютерної математики відповідна задача вирішується за допомогою однієї стандартної графічної команди.

В програмі реалізовано відображення результатів ітераційних розрахунків у вигляді графіка. На рис. 9 представлено скріншот графічного вирішення задачі за певними вихідними даними. Графік згенеровано серверною частиною програми на основі ітераційних розрахунків. Відповідні коор-

динати – проміжні результати всіх ітераційних розрахунків, які зберігаються у векторному форматі, представлено на графіку у векторній формі SVG. У такий спосіб ми маємо можливість виводу практично необмеженої кількості ітераційних розрахунків [5,7,8,18]. В програмі передбачено автоматичне масштабування графіка до розмірів ширини типового екрана мобільного гаджета. Векторна графіка дозволяє необмежено масштабувати (збільшувати) зображення без втрати якості при завданні великої кількості ітерацій. Відповідь задачі на перетині двох графіків – червона горизон-

тальна лінія показує задану витрату, а синім кольором відображено зростання витрат із глибиною потоку. В програмі передбачено автоматичний контроль наявності перевищення допустимої швидкості для заданих умов і виведення інформаційного поля із методичними рекомендаціями.

Програмно реалізовано аналіз результатів розрахунку та генерацію методичних рекомендацій щодо подальшого моделювання конструктивних елементів каналу. Відповідні загальні розширені рекомендації представлено на рис. 10.

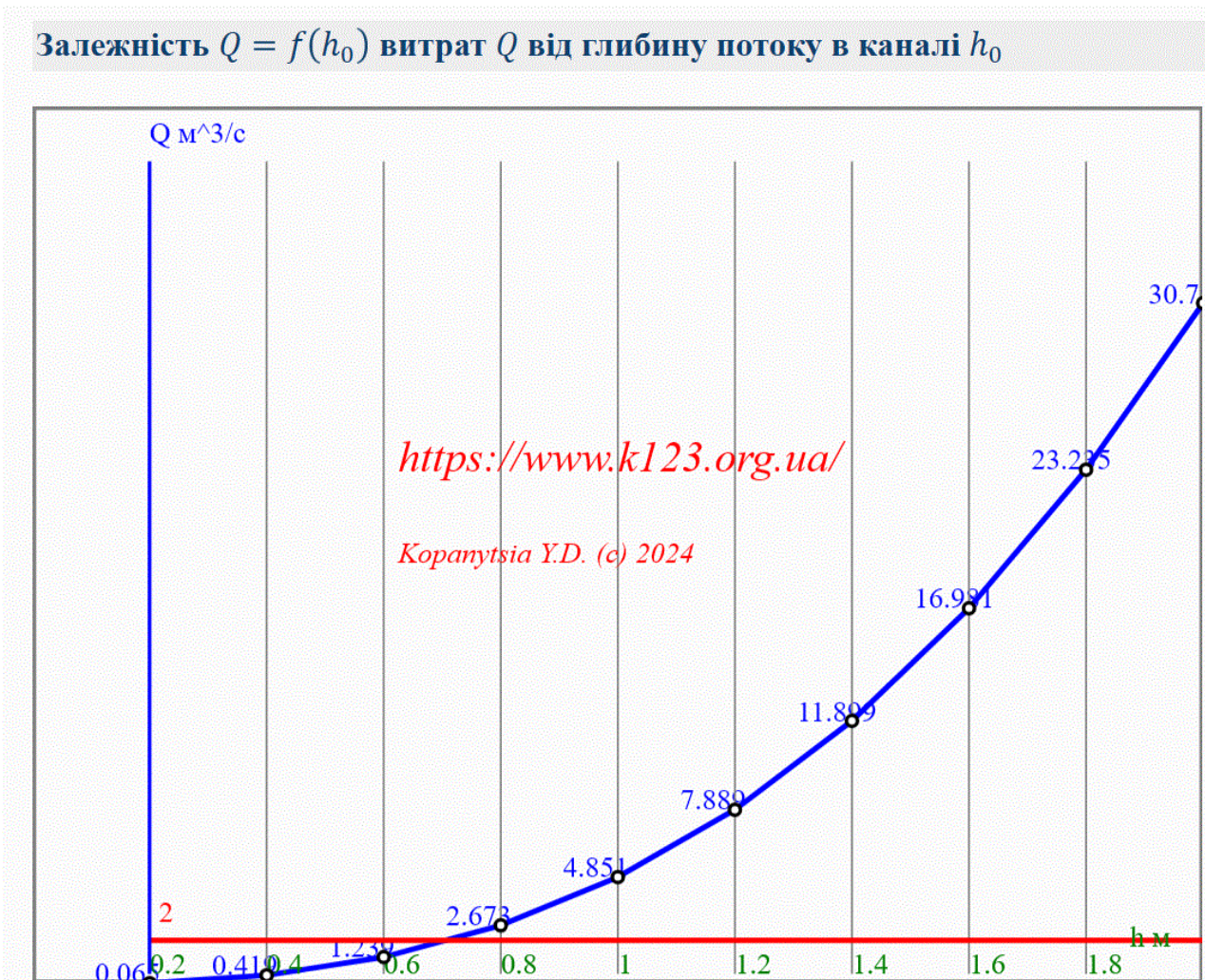


Рис. 9. Скріншот частини екрану динамічної сторінки із варіантом графічного розв'язку задачі

Fig. 9. Screenshot of part of the screen of the dynamic page with a variant of the graphical solution of the problem

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ:

Після остаточного визначення глибини і ширини русла гідравлічно найвигіднішого перерізу необхідно перевірити середню швидкість і з'ясувати чи буде русло розмиватися при даних умовах.

Для цього за **табл. 2** для заданого типу укріплення русла і отриманої в ході розрахунків глибини рівномірного руху знаходимо максимальну допустиму швидкість на розмивання $V_{\text{доп}}$ і порівнюємо її із середньою швидкістю V .

1. Якщо $V < V_{\text{доп}}$, то русло розмиватися не буде і **розрахунки закінчено**;
2. Якщо $V > V_{\text{доп}}$, то при даних умовах русло буде розмиватися і **розрахунки слід продовжити**.

В такому випадку русло потребує додаткового укріплення. Для цього за **табл.1** слід обрати тип додаткового укріплення каналу і в залежності від нього знайти новий коефіцієнт шорсткості.

Далі треба знову зробити аналогічні розрахунки вже з новим коефіцієнтом шорсткості. Визначити нормальну глибину і середню швидкість. Потім треба порівняти швидкість V із $V_{\text{доп}}$ вже для нової глибини і додаткового кріплення русла.

Рис. 10. Скріншот частини екрану динамічної сторінки із аналізом результатів розрахунку
Fig. 10. A screenshot of a part of the dynamic page screen with an analysis of the calculation results

ВИСНОВКИ

Програма онлайн розрахунку каналів гідравлічно найвигіднішого профілю трапецеїдальної форми, яку реалізовано за клієнт-серверною технологією дає можливість генерувати необмежену кількість різноманітних задач – <https://www.k123.org.ua/jeh4.html>.

Інтерактивна частина веб форми вводу даних та необмежена кількість миттєвих розрахунків впроваджує елементи моделювання та розрахункового експерименту із різними параметрами трапецеїдального русла: похил, шорсткість, матеріал укріплення русла тощо.

Розробка клієнт-серверних розрахунків реалізує захищений програмний код з відкритим або закритим доступом до онлайн форм вводу даних.

Генерація необмеженої кількості різноманітних навчальних задач із відповідями,

миттєві розрахунки та відображення всіх проміжних етапів інтерактивних розрахунків дозволяє впроваджувати елементи програмування та тестування власних рішень в системах комп'ютерної математики на персональних комп'ютерах у навчальному процесі. Використання безкоштовної відкритої програми системи комп'ютерної алгебри, наприкладі CAS MAXIMA, яка має порти для всіх основних операційних систем, дозволяє розгортати комп'ютерний клас у будь-якій навчальній аудиторії на базі персональних смартфонів, планшетів або ноутбуків студентів.

Запровадження елементів сучасного інженерного розрахунку в системах комп'ютерної математики на прикладі типових навчальних завдань розширює варіативність розрахунків [10-17]. Одна задача може бути вирішена: аналітично, графічно або ітераційними чисельними методами.

Перевірка отриманого рішення, окремого ітераційного розрахунку, графічне відображення залежностей відбувається шляхом використання веб форми клієнт-серверної програми генерації динамічної сторінки із чисельним та графічним рішенням для багатоваріантного, практично необмеженого, набору індивідуальних вихідних даних [5,7,18].

ЛІТЕРАТУРА

1. **Чоу В. Т.** Гидравлика открытых каналов / Пер. с англ. Москва: Стройиздат, 1969. 462 с.
2. **Константинов Ю. М., Гіжа О. О.** Інженерна гідравліка. Київ: Видавничий дім „Слово”, 2006. 432 с.
3. **Graf W. H.** *Hydraulique fluviale: écoulement non permanent et phénomènes de transport*, Tom 2, *Traité de Génie Civil*, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Presse polytechnique et universitaire romane, 1996. 259 с.
4. **Violet P. L, Chabard J. P.** *Mécanique des fluides appliquée*, Presse des ponts et chaussées, ed. Kreyszig E. *Advanced Engineering Mathematics*. Wiley, 1998. 1280 p.
5. **Копаниця Ю., Гіжа О., Павлов Є., Кострич Б., Матвієнко О.** Моделювання елементів розгалуженої мережі в CAS MAXIMA та серверні онлайн розрахунки у навчальному процесі // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2023, 45. 24-31.
6. **Копаниця Ю., Павлов Є., Толмачова Т.** Аналіз варіантів розрахунку сили гідростатичного тиску методом K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2023, 43. 4-15.
7. **Копаниця Ю., Гіжа О., Нечипор О., Таварткїладзе Н.** Веб-інтерфейс – приклад універсальної платформи інженерних розрахунків у навчальному процесі // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2022, 39. 11-32.
8. **Копаниця Ю., Гіжа О., Нечипор О., Таварткїладзе Н.** ВЕБ інтерфейс для визначення критичної глибини у відкритих руслах // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2021, 37. 29-41.
9. **Копаниця Ю., Гіжа О., Нечипор О., Таварткїладзе Н.** Визначення нормальної глибини потоку в системі CAS MAXIMA // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2021, 35. 21-30.
10. **Копаниця Ю. Д.** Визначення сили гідростатичного тиску на сферичну поверхню в умо-

вах відносної рівноваги рідини методом K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2020, 34. 12-18.

11. **Копаниця Ю. Д.** Аналіз алгоритмів визначення гідростатичного тиску на поверхню довільної форми за стандартними формулами і методом трьох команд K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2017. Вип. 28. С. 187-195.
12. **Копаниця Ю. Д.** Розрахунок гідростатичного тиску на несиметричну плоску поверхню. універсальний алгоритм трьох команд K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2016. Вип. 27. С. 177-186.
13. **Копаниця Ю. Д.** Визначення гідростатичного тиску на плоский сегмент методом трьох команд K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2016. Вип. 26. С. 148-152.
14. **Копаниця Ю. Д.** Інтегральні рівняння метода трьох команд K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2013. Вип.22. С. 161-173.
15. **Копаниця Ю. Д.** Аналіз виміру епюри гідростатичного тиску на криволінійну поверхню. Універсальний метод розрахунку K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2013. Вип. 21. С. 165-180.
16. **Копаниця Ю. Д.** Розрахунок гідростатичного тиску на криволінійну поверхню. Універсальний алгоритм трьох команд - K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2012. Вип. 20. С. 105-119.
17. **Копаниця Ю. Д.** Комп'ютерний розрахунок сили тиску. Універсальний алгоритм трьох команд - K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2012. Вип. 18. С. 148-163.
18. **Копаниця Ю., Гіжа О., Нечипор О., Кормільцін О.** Визначення сили гідростатичного тиску на плоску поверхню довільної несиметричної форми методом трьох команд K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА, 2024, вип.47. С. 12-22.

REFERENCES

1. **Chow, V. T. (1969).** *Hydraulic of open channels*. Per. From English. Moskva : Stroyizdat. [in Russian]
2. **Konstantinov, Yu. M., & Gizha, O. O. (2006).** *Inzhenerna hidravlika: Pidruchnyk*. Kyiv: Vydavnychy dim „Slovo”. [in Ukrainian]
3. **Graf, W. H. (1996).** *Hydraulique fluviale: écoulement non permanent et phénomènes de transport*. Tom 2. *Traité de Génie Civil*, Ecole

polytechnique fédérale de Lauzanne, Presse polytechnique et universitaire romane.

4. **Violet, P. L. & Chabard, J. P. (1998).** *Mécanique des fluides appliquée*. Presse des ponts et chaussées.

5. **Kopanytsia, Yu., Gizha O., Pavlov, Ye., Kostrych, B., & Matvienko, O. (2023).** Simulation of distributed network elements in CAS MAXIMA and server online calculations in the educational process method. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 45. 24-31. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.24-31>

6. **Kopanytsia, Yu., Pavlov Ye., & Tolmachova, T. (2022).** Analysis of calculation options of hydrostatic pressure by the K123 method. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 43. 4-15. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.43.4-15>

7. **Kopanytsia, Yu., Gizha O., Nechypor, O., & Tavartkiladze, N. (2022).** Web interface - an example of the universal platform of engineering calculations in the educational process. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 39. 11-32. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.39.11-32>

8. **Kopanytsia, Yu., Gizha O., Nechypor, O., & Tavartkiladze, N. (2021).** Web interface for determining critical depth in open channel. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 37. 29-41. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.37.29-41>

9. **Kopanytsia, Yu., Gizha, O., Nechypor, O., & Tavartkiladze, N. (2021).** Determination of normal flow depth in CAS MAXIMA system. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 35. 21-30. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.35.21-30>

10. **Kopanytsia, Yu. (2020).** Determination of the force of hydrostatic pressure on a spherical surface under conditions of relative equilibrium of a liquid by the K123 method. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 34. 12-18. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.34.12-18>

11. **Kopanytsia, Yu. (2017).** Analysis of algorithms for determining hydrostatic pressure on a surface of arbitrary shape according to standard formulas and the method of three commands K123. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 28. 187-195. Retrieved from <https://repository.knuba.edu.ua/bitstream/handle/987654321/3048/201728-187-195.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [in Ukrainian]

12. **Kopanytsia, Yu. (2016).** Calculation of hydrostatic pressure on an asymmetric flat surface. universal algorithm of three commands K123. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 27. 177-186. http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/PVVG_2017_27_26.pdf [in Ukrainian]

13. **Kopanytsia, Yu. (2016).** Determination of hydrostatic pressure on a flat segment by the method of three commands K123. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 26. 148-152. http://nbuv.gov.ua/j-pdf/PVVG_2016_26_22.pdf [in Ukrainian]

14. **Kopanytsia, Yu. (2013).** Integral equations of the method of three commands K123. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 22. 161-173. http://nbuv.gov.ua/j-pdf/PVVG_2013_22_20.pdf [in Ukrainian]

15. **Kopanytsia, Yu. (2013).** Analysis of hydrostatic pressure plot measurement on a curved surface. Universal calculation method K123. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 21. 165-180. http://nbuv.gov.ua/j-pdf/PVVG_2013_21_20.pdf [in Ukrainian]

16. **Kopanytsia, Yu. (2012).** Calculation of hydrostatic pressure on a curved surface. Universal algorithm of three commands - K123. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 20. 105-119. http://nbuv.gov.ua/j-pdf/PVVG_2012_20_13.pdf [in Ukrainian]

17. **Kopanytsia, Yu. (2012).** Computer calculation of pressure force. Universal algorithm of three commands - K123. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 18. 148-163. http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/PVVG_2012_18_17.pdf [in Ukrainian]

18. **Kopanytsia Yu., Gizha O., Nechypor O., & Kormilcin O. (2024)** Determination of hydrostatic pressure on the plane surface of an arbitrary non-symmetrical form by the three-command method K123. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 47. 12-22. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.47.24-31> [in Ukrainian]

Online modeling of calculation of channels of the most hydraulically advantageous cross-section

Yuriy Kopanytsia, Olena Gizha, Oksana Nechypor, Oleksandra Holoborodko, Andrii Gavryliuk

Abstract. The question of determining the depth of uniform movement is an integral part of many hydraulic calculations of open channels and various hydraulic structures. It is also necessary to know it when constructing free surface curves, determining their length, and studying the forms of conjugation of headwaters.

For uniform motion to exist, a number of conditions must be met: the channel must be prismatic, the roughness of the bottom and walls of the channel must remain unchanged, the slope of the bottom of the channel must be positive ($i > 0$). The depth along the stream also remains unchanged.

The paper presents a program for online calculation and modeling of the parameters of a trapezoidal channel of the hydraulically most advantageous shape, which includes a client and server part. The program is implemented using CGI technology [5-9] in the PERL language at the link <https://www.k123.org.ua/jeh4.html>.

Access protection to the program code and filtering and analysis of correct input of the output data are implemented using regular expressions. The program is designed taking into account modern requirements for mobile development: minimization of the code volume and compact format for displaying static and dynamic information, graphic output is presented in the vector format SVG.

Key words: most hydraulically advantageous cross-section, CAS MAXIMA, numerical methods, online calculation, web form, client-server program, modeling.

Стаття надійшла до редакції 09.03.2025