

© В.В. Шевчук, О.М. Іванік, М.В. Лавренюк, 2009

УДК 550.89 (477.87)

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
м. Київ*

РОЗРОБКА ЗАСОБІВ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СЕЛЕВОЇ НЕБЕЗПЕКИ В МЕЖАХ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ

Вступ та постановка проблеми. Одним із небезпечних геологічних процесів, що негативно впливають на функціонування природно-техногенних комплексів, є селеві потоки, що належать до категорії гравітаційно-водних процесів і характеризуються особливими геологічними, геоморфологічними та кліматичними умовами виникнення. Їм притаманна складна стадійність формування, нестационарний рух потоку та його лавинний характер.

Як правило, селі виникають у басейнах невеликих гірських річок внаслідок злив, інтенсивного танення снігу, проривів завальних озер, обвалів, зсувів, землетрусів. Їх швидкість становить зазвичай 2,5–4,5 м/с, однак під час прориву може сягати 8–10 м/с і більше. Селі можуть формуватися внаслідок обводнення пухкоуламкових порід, їх зсуві і наступному течінні грязекам'яної маси, так і завдяки взаємодії водного потоку із пухкими гірськими породами, що зустрічаються на його шляху. Обмаль кількісної інформації щодо характеристик селевого процесу у зв'язку з раптовістю їх прояву, короткочасністю та недостатнім методичним забезпеченням вимірів параметрів селевих потоків, ускладнює проблему розробки методів оперативного прогнозування селів та своєчасного попередження про селеву небезпеку.

За результатами тривалих досліджень науковців різних країн, у багатьох селенебезпечних районах розроблено низку методик прогнозу селенебезпеки, котрі враховують головні закономірності селеутворення, комплекс умов, що визначають селенебезпечну ситуацію, зокрема, геоморфологічні фактори, гідрометеорологічні параметри, критичні значення стоку, циклічність селевих явищ тощо [1–6]. Запропоновано формули для визначення динамічних характеристик водних та селевих потоків, їх швидкостей та витрат (Н.Е. Долговим, М.М. Протод'яконовим, М.Ф. Срібним, Д.Л. Соколовським, І.І. Херхеулідзе, М.С. Дюрнбаумом, П.В. Покровським та ін.). Розроблено моделі імовірнісної оцінки виникнення селів на основі декількох розрахункових параметрів, що характеризують склад потенційних селевих відкладів, басейнових характеристик та кліматичних показників [7].

Однак жодна з наявних методик прогнозу селенебезпеки не може вважатись універсальною, однаково прийнятною для регіонів із різними геолого-геоморфологічними та кліматичними характеристиками. Відповідно, актуальним залишається завдання розробки адекватних методів та засобів прогнозування селів, що враховують специфіку геологічної будови того чи іншого регіону, режим новітніх і сучасних геологічних процесів, умови формування та особливості розвитку селів.

Слід підкреслити нові можливості у питанні прогнозування селенебезпеки, що виникають завдяки залученню сучасних комп'ютерних технологій, зокрема, ГІС-методів та комп'ютерного моделювання. Оперативні масові розрахунки у режимі моделювання з використанням найнеобхідніших параметрів конкретних геологічних комплексів, морфоструктур та віртуальних селевих потоків дозволяють визначити критичні умови виникнення селів у різнопорядкових долинах, кількісно оцінити їх силовий вплив на техногенні споруди та розробити відповідні комплекси випереджувальних заходів. Саме створення подібного розрахункового модуля мали на меті автори даного повідомлення.

Алгоритм кількісної оцінки впливу селевих потоків на інженерні споруди в умовах Карпатського регіону. Для побудови концептуальних моделей селевих процесів на загальному фоні майже повної відсутності кількісних даних спостережень за селями необхідними є встановлення певних гіпотез та визначень щодо протікання селевого процесу із обов'язковим отриманням визначальних параметрів селів. Очевидно, що обрані вихідні позиції обумовлюють особливості створених на їх основі засобів якісного і кількісного прогнозування.

У межах Карпатського регіону переважають низькогірні і низькоселеносні басейни зі значною диференціацією потоків за довжиною, кутами нахилу та морфологією долин, ступенем покриття рослинністю схилів, літологією та механічними властивостями породних комплексів, що розмиваються. Селеві потоки, переважно зливові, належать до незв'язних, водних, таких, що транспортують наноси, близьких до потоків, визначальні параметри яких досліджуються у русловій гідродинаміці. Різниця між водним і селевим потоком чи паводком досить непевна, вони можуть переходити один в інший через перехідні потоки із об'ємною вагою $1,05\text{--}1,20\text{ г/см}^3$. Їх прогнозування базується на оцінці критичних об'ємів опадів і стоку, котрі можуть формувати у відповідних геологічних, геоморфологічних та гідрометеорологічних умовах руйнівні селеві явища. Розрахунки впливу селевих потоків на інженерні споруди в межах Закарпаття на основі раніше запропонованого алгоритму [8, 9] показали доволі вузькі рамки умов, за яких результати розрахунків можна вважати прийнятними, і обумовили необхідність суттєвого його вдосконалення.

Викладений нижче алгоритм базується на емпіричних даних щодо Карпатського регіону та фундаментальних законах гідродинаміки, зокрема формулі Бернуллі, із застосуванням якої отримується вираз для ударного гідродинамічного тиску. Вважаючи, що рух ідеальної рідини є адіабатичним та стаціонарним, а масові сили – консервативними, на лініях течії виконується співвідношення, яке називається інтегралом Бернуллі:

$$\frac{v^2}{2} + \Pi + P = \text{const.} \quad (1)$$

Для однорідної нестисливої рідини $\rho = \text{const}$ і тому

$$\frac{v^2}{2} + \Pi + \frac{P}{\rho} = \text{const.} \quad (2)$$

Якщо масові сили – сили тяжіння ($\Pi = gz$), то

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} = \text{const}, \quad (3)$$

де $\frac{v^2}{2g}$ – швидкісна висота, z – геометрична (нівелірна) висота, $\frac{P}{\rho g}$ – п'єзометрична висота.

Якщо розглянути два перерізи потоку, позначивши їх 1 та 2, а через $p_1, v_1, z_1, p_2, v_2, z_2$, позначити відповідні значення тиску, швидкості і висоти для кожного з цих перерізів, матимемо іншу форму запису інтегралу Бернуллі:

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g}. \quad (4)$$

Вибираючи тепер положення другого перерізу на стінці нерухомої перешкоди матимемо очевидні рівності: $v_2 = 0, z_1 = z_2$. Звідси $\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_2}{\rho g}$ або

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{(p_2 - p_1)}{\gamma} = \frac{v^2}{2g}. \quad (5)$$

Враховуючи найбільш несприятливий сценарій зіткнення потоку із перешкодою, коли має місце удар важкого уламку породи по стінці перешкоди, останню формулу можна переписати у вигляді:

$$\frac{p}{\gamma} = K\alpha \frac{v^2}{2g}, \quad (6)$$

де K – коефіцієнт, що враховує характеристики тіл, які зазнають удару; при розглядуваному типі удару він покладається рівним 2, а α – поправочний коефіцієнт швидкості по кількості руху, він покладається рівним 1–1,33.

Слід зауважити, що, використовуючи формулу Бернуллі, ми припускаємо, що потік веде себе як ідеальна нестислива рідина, хоча в реальності він є сумішшю з істотною різницею значень густини твердої та рідкої фракції.

Одержимо тепер вираз для гідростатичного тиску. Згідно з гідростатичним парадоксом Паскаля, маємо наступний вираз для головного вектора сил тиску рідини на стінку перешкоди з площею поверхні S : $R = \gamma z_c S$, де z_c – вертикальна координата центру тяжіння C площі S . Звідси для тиску одержимо:

$$p = \frac{R}{S} = \gamma z_c, \quad (7)$$

або

$$\frac{p}{\gamma} = z_c = \frac{H}{2}, \quad (8)$$

де H – глибина потоку.

Таким чином, складаючи вирази для ударного гідродинамічного та гідростатичного тиску, одержимо вираз для повного тиску потоку на перешкоду:

$$p = \gamma \frac{H}{2} + \gamma K \alpha \frac{v^2}{2g} = \frac{\gamma}{g} \left(\frac{gH}{2} + K \alpha \frac{v^2}{2} \right). \quad (9)$$

Покладаючи в цій формулі $g \approx 10$, матимемо:

$$p = \gamma \frac{H}{2} + \gamma K \alpha \frac{v^2}{2g} = 0.1 \gamma \left(5H + K \alpha \frac{v^2}{2} \right). \quad (10)$$

При $K = 2$ та $\alpha = 1$ одержимо відому формулу І.І. Херхеулідзе, використану у роботі [4] :

$$P_{\text{повний}} = 0,1 \gamma_c (5H_0 + v_c^2), \quad (11)$$

де $P_{\text{повний}}$ [т/м²] – повний тиск; γ_c [т/м³] – середня густина (питома вага) селевого потоку; H_0 [м] – його глибина; v_c [м/с] – його швидкість.

Як це впливає із формул (10) і (11), для кількісного прогнозу віртуального силового впливу селевого потоку на різноманітні об'єкти чи споруди необхідне визначення ряду параметрів селевого потоку чи селевого паводку, що само по собі є доволі складним завданням. Геолого-геоморфологічні дані щодо площ водозбору, параметрів різнопорядкових річкових долин, характеристик потенційно селеутворювальних, здатних роз-

миватись пухких відкладів та деяких інших, встановлені попередніми дослідженнями і входять до регіональних баз даних або відображені на спеціальних картах регіону, у тому числі прогнозних. Це стосується також даних багаторічних гідрометеорологічних спостережень, які використовуються, зокрема, для встановлення режиму опадів, періодичності екстремальних ситуацій, визначення середньої їх інтенсивності, густини селів тощо. Значні труднощі виникають при визначенні головного динамічного параметра селевого потоку – його швидкості, а також глибини, пов'язаних із характером русел і долин, кількістю опадів, режимом стоку, витратами потоку.

Розрахункові формули максимальних витрат дощових паводків дуже різноманітні, базуються на різних принципах. Більшість з тих, що отримали достатньо широке застосування, враховують площу водозбору, інтенсивність зливи та повноту стоку, а також менш значущі фактори, вплив яких передається корегувальними коефіцієнтами.

Серед об'ємних формул дощового стоку набула поширення і була використана у [10] формула Д.Л. Соколовського, котра враховує об'єм і форму паводка:

$$Q_c = \frac{0,28\alpha H_t F_v}{t} f_h, \quad (12)$$

де Q_c [м³/сек] – витрати потоку; H_t [мм] – кількість опадів, визначається як добуток середньої інтенсивності дощу і його тривалості; α – коефіцієнт стоку; t [год] – час підняття паводку; F_v [км²] – площа водозбору; f_h – коефіцієнт форми гідрографу.

Коефіцієнт стоку дощових паводків залежить від кількості опадів та від попередньої зволоженості ґрунтів і режиму інфільтрації. Його значення для високих дощових паводків відзначається відносною витриманістю за географічними зонами і визначаються за аналогією із раніше вивченими басейнами. В умовах Карпатського регіону коефіцієнт стоку у сухий період змінюється від 0 до 0,2, у вологий – зростає до 0,4 – 0,5, а в особливо дощові періоди сягає 0,7.

Ефективність використання формули Д.Л. Соколовського у розрахунковому модулі знижується через неточність визначення величини t та коефіцієнту f_h . Використання для визначення останнього емпіричної формули:

$$f_h = \frac{12}{4 + v}, \quad (13)$$

де v [м/сек] – найбільша швидкість по перерізу потоку, потребує даних щодо ще більш змінного параметру – швидкості потоку.

Фаза підняття графіку паводка складається із пологої частини, яка відображає стік води найближчих прируслових схилів, і крутої частини, обумовленої притоком води від більшої частини басейну:

$$t = \tau_{\text{п}} + t_{\text{п.д}}, \quad (14)$$

За умови відомої швидкості та відсутності спостережень

$$\tau_{\text{п}} = \frac{L}{3,6 v}, \quad (15)$$

де L [км] – довжина русла до розрахункового створу, v – середня швидкість добігання піку паводку, що дорівнює у свою чергу $v = 0,70 v_{\text{max}}$, де v_{max} – максимальна швидкість течії у створі (м/сек); $\tau_{\text{п}}$ – час добігання піка паводка, рівна часові здвигу між піком дощу і піком паводку [год]; $t_{\text{п.д}}$ – тривалість підняття дощу.

За часом добігання піка паводку визначається розрахункова тривалість зливи

$$T = \mu \tau_{\text{п}}, \quad (16)$$

де T – розрахункова тривалість опадів; $\tau_{\text{п}}$ – час добігання піка паводка; μ – коефіцієнт сповільнення стоку. При $\tau_{\text{п}} < 10\text{--}15$ год, $T = \tau_{\text{п}}$. Значно простішою для прогнозних розрахунків видається формула Н.Є. Долгова для повного стоку:

$$Q_{\text{max}} = k_{\text{p}} a \alpha F, \quad (17)$$

де k_{p} – коефіцієнт розмірності; a – середня інтенсивність зливи; α – коефіцієнт стоку; F – площа басейну. Якщо визначати Q_{max} у м³/сек, a – у мм/год, а F – у км², то формула (17) матиме вигляд

$$Q_{\text{max}} = 0,28 a \alpha F. \quad (18)$$

Загалом зливи та дощі з огляду на ефект у відношенні стоку поділяються на декілька типів: 1) зливи – короткі та інтенсивні дощі тривалістю не більше, ніж 2–3 год та середньою інтенсивністю $a \geq 10\text{--}20$ мм/год; 2) зливові дощі тривалістю від декількох годин до декількох діб із середньою інтенсивністю $a \geq 2\text{--}10$ мм/год; 3) обложні дощі, як правило, інтенсивністю 3–5 діб та більше з невеликою середньою інтенсивністю $a < 2$ мм/год. Максимальний селевий ефект мають зливові дощі першого типу, хоча ймовірність виникнення селів унаслідок інших типів є також високою. До цього ж слід додати, що загальна тривалість дощів не дає змоги охарактеризувати їх стосовно стокового ефекту, бажаним є врахування тривалості їх ефективної частини, під час якої інтенсивність дощу перевищує інтенсивність інфільтрації, так звану тривалість водовіддачі, під час якої і відбувається процес стоку [10]. Зрозуміло, що зі зростанням тривалості дощу зменшується його інтенсивність (рис. 1).

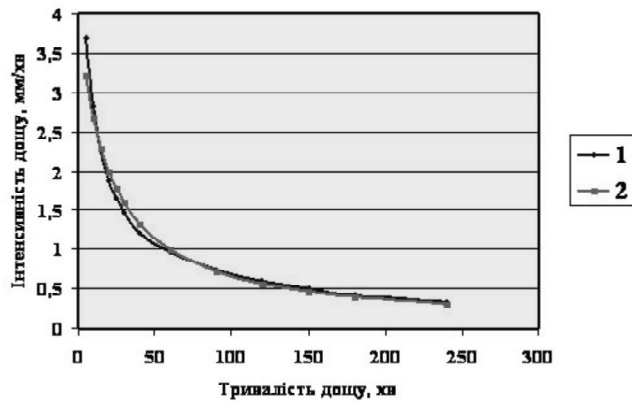


Рис. 1. Діаграма залежності інтенсивності дощу від тривалості для східної Європи (за даними М.М. Протод'яконова [11]): 1 – середня інтенсивність дощу; 2 – інтенсивність дощу за розрахунковою формулою.

Інтенсивність зливи розраховується за наступною формулою [11]:

$$a = \frac{c}{1 + bt}, \quad (19)$$

де b та c – параметри, що визначаються за метеорологічними даними для певного кліматичного району. Шляхом відповідної зміни параметра b можна змінювати співвідношення розрахункової інтенсивності коротких тривалих дощів. Параметр c дозволяє враховувати більшу чи меншу інтенсивність дощів рівної тривалості.

Для східноєвропейської території ця формула набуває вигляду (розрахована на основі даних багаторічних метеорологічних спостережень за 28 метеостанціями у цьому регіоні):

$$a = \frac{5}{1 + 0,06t}. \quad (20)$$

Ключове значення у розрахунковому модулі безперечно має вибір способу обрахування швидкості селевого потоку. Коректне визначення значень швидкості водних та селевих потоків вкрай необхідне для прийняття рішень щодо інженерного регулювання селів. Відомо, що швидкість руслового добігання залежить від форми русла, його нерівностей та глибини потоку. Зазвичай швидкість визначається за широко відомою формулою Шезі. Однак, як справедливо зазначає Д.Л. Соколовський, значна мінливість коефіцієнтів нерівностей русел, а також та обставина, що формула Шезі відображає рівномірний рух, в той час, як у природних руслах він є нерівномірним, обумовлюють невисоку точність розрахунків [10]. Оскільки морфометричні елементи русла, зокрема, глибина і ухил, що входять до формули Шезі, змінюються не менше від швидкості, причому, зі збільшенням глибини ухили, як правило, зменшуються, то сама швидкість часто виявляється

більш постійною величиною, ніж її складові. Тим не менше, він пропонує уточнену на основі дослідних даних формулу:

$$V_{\max} = 17,0J^{0,40}h_{\text{cp}}^{0,50}, \quad (21)$$

де V_{\max} – максимальна швидкість у створі; J – ухил русла; h_{cp} – середня глибина по живому перерізі за максимального накопичення.

На основі формули Шезі запропоновано низку інших формул з визначення швидкості потоку. Певного поширення набули формули М.Ф. Срібного, М.А. Мосткова, І.І. Херхеулідзе та ін. відзначаючи залежність швидкості стоку V м/сек від ухилу русла I ‰, від кількості води, що стікає, яка вимірюється витратами води Q м³/сек, а також від нерівностей поверхні і поперечного перерізу русла, М.М. Протод'яконов пропонує визначати швидкість руслової течії за формулою Шезі із коефіцієнтом за Маннінгом [11]:

$$V = k_1 Q^{\frac{1}{4}} I^{\frac{3}{8}}, \quad (22)$$

де $k_1 = 0,075 \left(\frac{1}{n}\right)^{\frac{3}{4}} k^{\frac{1}{2}}$.

Тут I – середній ухил русла, ‰ ; $\frac{1}{n}$ – коефіцієнт нерівностей дна;

$k = \frac{R}{\sqrt{\omega}}$ – коефіцієнт, що залежить від форми поперечного перерізу русла;

R – гідравлічний радіус, м; ω – площа живого січення, м².

За М.Ф. Срібним, у розрахунках зазвичай приймають $1/n = 25$ (при крайніх значеннях для періодичних потоків – від 15 до 30), $k = 0,30$ (крайні значення: від 0,15 до 0,40). Відтак, близьке до середнього значення $k_1 = 0,46$.

Формули (21, 22) також не позбавлені зазначених недоліків, тому у розрахунковому модулі вони використовуються як засіб вибіркового і контрольного співставлення результатів розрахунків, отриманих іншими, більш експресними методами, що базуються переважно на узагальнених емпіричних даних.

Важливо зазначити, що максимальні рівні усереднених значень швидкості водних потоків різних порядків одночасно відображають інтенсивність опадів (витрати потоків) та особливості долин (поздовжні і поперечні профілі, терасованість тощо), котрі у свою чергу відображають час формування долин і ступінь реалізації ерозійного потенціалу під час тих чи інших неотектонічних рухів. Очевидно, що режими зростання швидкості до критичних (селеутворювальних) рівнів не можуть бути однаковими: у коротких високопорядкових притоків зі значними ухілами і порівняно вузькими до-

линами вони швидко досягаються навіть внаслідок короткотривалих злив і, навпаки, у довгих потоках (річках) із терасованими долинами досягнення критичних значень швидкості можливе лише під час тривалих злив, котрі, формуючи однопікові повені на крупних річках, викликають багатопікові паводки на коротких. Водночас, у долинах різної довжини значення швидкості стабілізуються, сягаючи певного рівня за будь-якої тривалості опадів. Тренди виходу швидкості на понадкритичний та максимальний рівні у потоках різних порядків залежно від тривалості злив можуть встановлюватись для того чи іншого регіону за багаторічними спостереженнями і використовуватись в якості інтегральної характеристики для прогнозування повеневої та селевої небезпеки. На жаль, емпіричних даних щодо реальних значень швидкості, що мали місце у різнопорядкових потоках Карпатського регіону під час повеней та селів, недостатньо для встановлення однозначних залежностей, такі дані повинні накопичуватись у майбутньому із налагодженням відповідного моніторингу. Тим не менше, спроба узагальнення наявних даних у межах порівняно невеликого Закарпатського полігону виявилась доволі перспективною.

Аналіз рисунку гідрографічної сітки у межах річкових долин дослідженого регіону дав можливість провести класифікацію русел за довжиною та рисунком гідрографічної сітки. Річкова сітка із деревовидним рисунком має приблизно однакову довжину приток, яка становить близько одного кілометра. Такі притоки є найбільш селенебезпечними, вони відзначаються значними ухилами русел, V-подібним профілем долин зі слабкою задернованістю і залісненістю схилів. Головні русла у цих випадках можуть мати значну довжину і терасовані долини. Селенебезпечними у них можуть бути лише певні відрізки із локальним розвитком пухких відкладів, придатних для селеформування. Якщо ж рисунок гідрографічної сітки має пір'ясту будову при довжині приток до 3 км (що не набагато перевищують довжину головного русла), форма площі водозбору та режим добігання обумовлюють також високу ступінь селенебезпеки у притоках і головному руслі, але за суттєво більшої тривалості опадів. У потоках довжиною понад 5 км селенебезпечними можуть бути лише певні інтервали, навіть якщо повені достатньо регулярні, за відповідної тривалості злив.

Пропонується поділ русел на три групи за характерною довжиною русла: 1) $L_1 < 1$ км; 2) $1 \leq L_2 < 5$ км; 3) $L_3 \geq 5$ км. На підставі аналізу наявних даних для кожної групи приймаються наступні емпіричні залежності тривалості злив із урахуванням зміни інтенсивності та критичної швидкості:

$$v_1 = 5\sqrt{T} ; v_2 = 3\sqrt[4]{T} ; v_3 = 2\sqrt[6]{T} .$$

Таким чином, задаючи інтенсивність зливи – H_p , її тривалість у годинах – T , площу території, на яку він випав – F_v , здатність ґрунту вбирати воду – коефіцієнт α та передбачувану довжину русла для даної місцевості – L , обчислюємо швидкість та витрати селевого потоку – v_c і Q_c .

З іншого боку, ці величини пов'язані із площею русла селевого потоку наступним співвідношенням:

$$Q_c = v_c \cdot S \quad (23)$$

де S площа поперечного перерізу русла селевого потоку. З формули (23) маємо:

$$S = \frac{Q_c}{v_c}. \quad (24)$$

Вважатимемо, що поперечний переріз русла має форму трапеції з основами a , b та висотою H_0 , тоді

$$S = \frac{a+b}{2} \cdot H_0. \quad (25)$$

Припускаючи, що ширина русла на дні (величина a) та кути нахилу схилів русла (φ_1 , φ_2) є відомими, з геометричних міркувань отримуємо:

$$b = a + H_0 (\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_2)$$

та

$$S = \left[a + \frac{H_0}{2} (\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_2) \right] \cdot H_0. \quad (26)$$

Прирівнюючи праві частини співвідношень (24, 25), отримуємо рівняння для знаходження глибини селевого потоку H_0 за заданими значеннями кутів нахилу схилів та ширини потоку на дні, а також за знайденими раніше витратами та швидкістю селевого потоку:

$$H_0^2 (\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_2) + 2aH_0 - 2\frac{Q_c}{v_c} = 0. \quad (27)$$

Звідси

$$H_0 = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 2\frac{Q_c}{v_c} (\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_2)}}{\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_2}. \quad (28)$$

Визначаючи кути нахилу схилів русла слід враховувати, що вони зазвичай є неправильними поверхнями змінної крутизни. Однак локальні зменшення та збільшення крутизни взаємно компенсуються, унаслідок чого крутизна схилів може вважатись постійною, тобто схили можуть враховува-

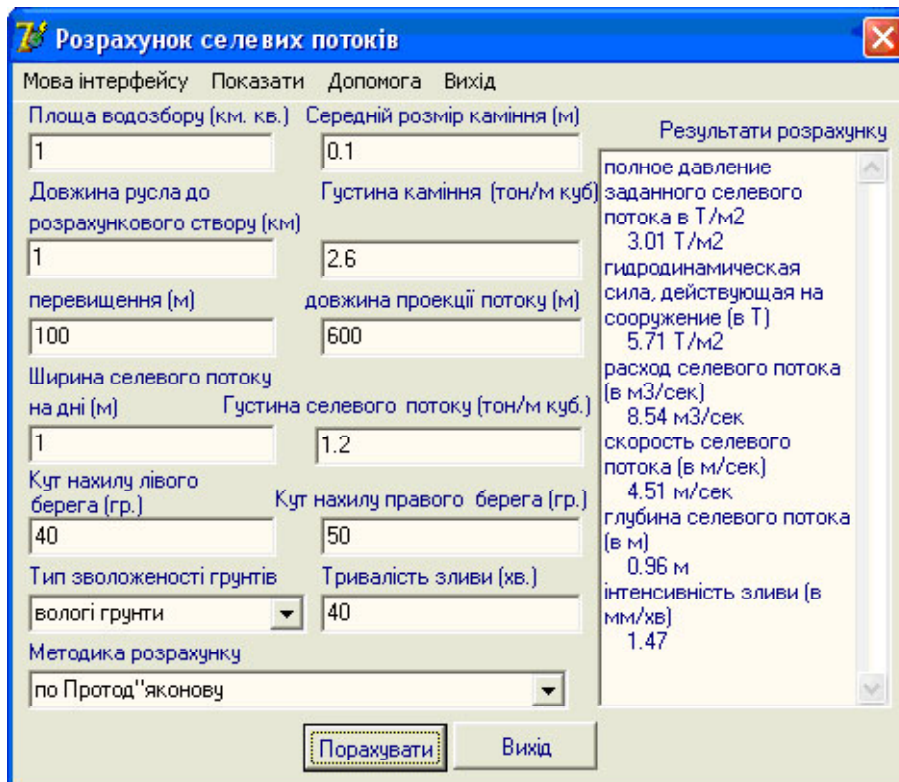


Рис. 2. Скріншот програмного модуля по розрахунку впливу селевих потоків на інженерні споруди

тись у вигляді площин з нахилом, рівним середньому нахилу схилів. Ця обставина враховувалась при отриманні даних щодо кутів нахилу схилів як за вимірами впродовж польових робіт, так і при використанні даних ГІС-проекту по Карпатському полігону.

Таким чином, задаючи густину селевого потоку та використовуючи побудовану математичну модель, можемо розрахувати повний нестационарний (динамічний) тиск селевого потоку на інженерну споруду (формула (11)).

Гідродинамічна сила, що діє на споруду, обчислюється за формулою:

$$F = P_{\text{повний}} \cdot S. \quad (29)$$

Висновки. Представлений алгоритм, що базується на емпіричних даних щодо Карпатського регіону та фундаментальних законах гідродинаміки, демонструє необхідність вибору розрахункових формул та величин, визначення яких є можливим у конкретних ситуаціях та відповідних геолого-геоморфологічних умовах. На основі запропонованого алгоритму створено програмний модуль для розрахунку навантажень, що передаються на інженерну споруду під впливом зовнішнього середовища (рис. 2). Даний модуль дозволяє проводити моделювання впливу селевих потоків, сформованих у межах Карпатського регіону, на техногенні об'єкти різного призначення із урахуванням параметрів як самих потоків, так і геолого-геоморфологічних і гідрометеорологічних даних. Отримані результати використовуватимуться для прийняття випереджувальних заходів щодо негативної дії селів у Карпатах.

1. Багрій І.Д., Блінов П.В., Гожик П.Ф., Кожем'якін В.П. Активізація небезпечних геологічних явищ у Закарпатті як наслідок екстремальних паводків. – К., 2004. – 210 с.
2. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. – Л.: Недра, 1977.
3. Руководство по изучению селевых потоков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 144 с.
4. Флейшман С.М. Сели. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 312 с.
5. Херхеулидзе И.И. Расчет основных характеристик селевых потоков // Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – С. 384–394.
6. Херхеулидзе И.И. Сквозные защитные и регуляционные сооружения из сборного железобетона на горных реках. – М.: Гидрометеоиздат, 1967. – 131 с.
7. Cannon S., Gartner J., Rupert M., Michael J. A method for the rapid assessment of the probability of post-wildfire debris flow from recently burned basins in the intermountain west, U.S.A. // Geophysical Research Abstracts. – Vol. 8. – 02030. – 2006.
8. Іванік О.М. Головні особливості взаємозалежностей факторів формування селевих потоків у межах басейну р. Абранка // Вісник Київ. ун-ту. Серія Геологія. – Вип. 43. – 2008. – С.16–19.
9. Шевчук В.В., Горбань В.О., Іванік О.М. Комп'ютерне моделювання впливу селевих потоків на інженерні споруди // Вісник Київ. ун-ту. Серія Геологія. – Вип. 42. – 2007. – С. 117–119.
10. Соколовский Д.Л. Речной сток (Основы теории и методики расчетов). – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 539 с.
11. Протодьяконов М.М. Определение максимального стока поверхностных вод с малых водосборов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1960. – 171 с.