

гідрологічного та геологічного характеру. Найбільш небезпечними регіонами, що зазнають впливу стихійних і комплексу небезпечних метеорологічних явищ є Закарпаття, де за останні десять років втретє пройшла катастрофічна повінь. Цим літом стихія забрала життя людей, лишила без домівок тисячі сімей, нанесла економіці України значний збиток. Вирішення цієї проблеми може бути забезпечено через підвищення надійності і деталізації розрахунку, а також прогнозування стоку, що може бути реалізовано шляхом математичного моделювання процесів його формування. Тому на цей час найбільш інтенсивно розвиваються методи обчислення ходу стоку саме на основі математичних моделей. «Паводок був масштабним, але завдяки комплексу протипаводкових заходів, здійснених за ці роки, їх вдалось мінімізувати. Важливим моментом є і те, що завдяки унікальній системі автоматизованого спостереження "Тиса" вдалося за 2 доби попередити органи місцевого самоврядування області про можливий розвиток надзвичайної ситуації та моделювати можливі зони затоплення. Відповідні служби знали, де чекати найбільшої біди і могли приймати адекватні ситуації рішення.» [1]

Математичне моделювання дозволяє вдосконалити методичну базу в області гідрологічних розрахунків і прогнозування, надає широкі можливості для більш глибокого вивчення складних взаємозв'язків у механізмі стокоутворення, які відбуваються на водозборі.

Найбільше поширення в гідрологічній практиці отримали так звані концептуальні моделі, в яких теоретичні передумови використовуються при виборі їх структури, а параметри визначаються за даними спостережень за вхідними і вихідними характеристиками [2,3,4]. При оцінюванні параметрів у цих моделях широко використовуються оптимізаційні процедури. Розроблена досить значна кількість моделей такого типу. Не дивлячись на окремі суттєві відмінності таких моделей, їх структури мають багато спільного. Тому коротко розглянемо деякі з них, які уже використовувались у практиці гідрологічних обчислень.

Модель синтезу процесів річкового стоку і регулювання водосховища – SSARR розроблена Корпусом військових інженерів США. Основною їх особливістю є використання в розрахунках даних гідрологічних метеорологічних спостережень на порівняно невеликих водозборах. Увесь водозбір поділяється на сукупність часткових, для кожного а яких, за даними наведених вище спостережень, розраховується хід стоку. Модель ІНДМ розроблена в інституті гідрології Великобританії. Ця модель найбільш детально описує всі основні процеси, які відбуваються на водозборі. Модель Ю.М. Денисова [5] розроблена для використання в умовах гірської місцевості, включає в себе блоки надходження дощової води на поверхню водозбору.

З великої кількості моделей, які дозволяють виконувати прогнозування, найбільшого поширення отримали методи, запропоновані Р.А. Тумасом, В.Ф. Шебеко, В.І. Коренем і Л.С. Кучментом, І.Г. Рубцовим. Вони найбільш повно враховують основні стокоутворюючі фактори і умови формування паводку. Проте всі ці моделі не враховують меліорованості та зарегульованості території, не дозволяють вести безперервне прогнозування ходу стоку з врахуванням мінливості метеорологічної обстановки та можливості його корегування по мірі уточнення фактичної і прогнозованої ситуації. Ці недоліки вра-

ховані Сусідком М.М. в математичній моделі формування дощового стоку на водозборах гірських річок, яка дозволяє з достатньою для виробничих умов точністю враховувати основні стокоутворюючі фактори й умови формування паводків та вести безперервне прогнозування як об'єму так і ходу стоку з урахуванням мінливості метеорологічної обстановки [5,6,7,8].

Особливості системи прогнозування паводків у Закарпатті. Математичні моделі дощового стоку ДОЩ-3 і сніго-дощового стоку СНІГ-3 є розрахунковою основою системи "Тиса" [8] формування стоку води з гірських водозборів. Ці моделі концептуальні. В їхній структурі опріорна інформація про фізичні характеристики щодо гідрологічних і метеорологічних процесів, які призводять до водоутворення та перебігу. Оскільки річкові водозбори (чи їх часткові площі) подаються в цих моделях як динамічні системи, модельні рішення кожного процесу формування стоку води здійснюються за принципом змінних стану, який умовно описується :

$$st(t + \Delta t) = st(t) + V_{st} \Delta t, \quad (1)$$

де $st(t + \Delta t)$ і $st(t)$ – змінні стану гідрометеорологічної величини в моменти $t + \Delta t$ і t ; $st V$ – змінна, що визначає швидкість зміни стану; Δt – часовий крок.

Для короткотермінового прогнозування перебігу витрат рівнів води на ділянці р. Тиса від смт. Великого Бичкова до м. Чопа призначена модель ТИСА-3. «Методичні засади моделі ґрунтуються на врахуванні розподілу водних мас по довжині річкової ділянки в початковий момент часу $Q(t)$ та інтенсивності припливу води на ділянку $np Q(t)$. Таким чином,

$$Q(t + \Delta t) = f[Q np(t), \bar{Q}(t)], \quad (2)$$

де $Q(t + \Delta t)$ – витрата води біля нижнього створу ділянки через інтервал Δt .

З використанням моделі ТИСА-5 здійснюється короткотермінове прогнозування перебігу стоку на притоках Тиси. В основу прогнозування покладено розгляд витрати Q_i через i -тий замикальний створ водозбору на момент $t + \Delta t$, сформованої за рахунок двох чинників – скидання води із руслової мережі та припливу води ΔQ внаслідок випадіння дощу або сніготанення за період від $t - \Delta t$ до t , тобто i

$$Q_i(t + \Delta t) = Q_i(t + \Delta t) = Q_i(t + \Delta t, P = 0) + \Delta Q(t + \Delta t),$$

$$Q_i(t + \Delta t, P = 0) = f_i[\bar{Q}(t)],$$

$$\Delta Q(t + \Delta t) = \gamma P(t - \Delta t, t),$$

$$\gamma(t, t + \Delta t) = \varphi[\bar{Q}(t)], \quad (3)$$

де $P = 0$ – відсутність опадів; $Q(t)$ – середня витрата в річкової мережі; γ – коефіцієнт стоку. У моделі ТИСА-5 використовуються параметри функцій впливу, визначені для моделі ДОЩ-3.

Модель ТИСА-10 призначена для прогнозування максимальних витрат/рівнів води на малих гірських річках басейну Тиси під час дощових паводків. Параметри для всіх 21 створів отримані шляхом моделювання паводків за моделлю ДОЩ-3. Для визначення шару стоку (h), який відповідає максимальній витраті води, залучено дві найбільші ординати функції впливу (P_1, P_2), визначені моделюванням паводків:

$$h = h_1 P_2 + h_2 P_1, \quad (4)$$

де h_1 і h_2 – шари стоку за два суміжні інтервали. Прогнозування максимальної витрати, а через неї й рівня

води, здійснюється поступово за 2-3 кроки в міру надходження інформації про опади.

Модель СЛОУ-3. На її застосуванні ґрунтується довготермінове прогнозування характеристик весняного стоку. У структурі моделі враховані процеси, що відбуваються на поверхні водозбору протягом зимового сезону та призводять до накопичення снігового покриву, зміни зволоження та промерзання ґрунту, тобто створюють передумови до формування весняного стоку. Оскільки ці процеси відбуваються на території гірських водозборів з різною інтенсивністю внаслідок складних орографічних умов, вони розглядаються по висотних зонах з урахуванням ступеня їх залісеності. Оцінювання шару весняного стоку з виділених висотних зон часткових площ басейну здійснюється шляхом воднобалансового рішення »[8].

Моделювання процесів формування талодощового стоку на гірському водозборі. Перед початком обчислень необхідно досконало вивчити воднофізичні, кліматичні, гідрологічні та гідрогеологічні умови формування стоку і фактори, які впливають на його розподіл з метою введення відповідних поправок у розрахунки залежності. При опрацюванні рядів вхідної інформації, яка використовувалась для складання ретроспективних прогнозів стоку, виконувався ретельний аналіз результатів вимірювань опадів, дефіцитів вологості повітря, швидкості вітру, запасів в ґрунті та стоку річок у весняно-осінній період. При аналізі проводилось співставлення гідрографів припливу води до розрахункових створів з атмосферними опадами, дефіцитом вологості повітря, рівнями води у відкритій мережі та меліоративних системах та наповненням водосховищ. Крім того, таке ж порівняння проводилось ними з даними сусідніх водозборів і найближчих метеорологічних станцій.

Кількість опадів, поряд з матеріалами спостережень метеостанцій за дефіцитом вологості повітря й швидкостями вітру відноситься до основних вхідних даних для прогнозування витрат води з використанням математичної моделі. Тому, чим точніше враховувати значення цих величин, тим достовірніший об'єм та гідрограф стоку. На метеостанціях опади вимірюються 4 рази на добу з 6-годинним інтервалом, на постах прийняті 2-строкові спостереження (08 і 20 годин). Гідрологічні пости обладнані самописцями дощу, які працюють у теплий період року. В середньому на один пункт спостережень за опадами проходиться 270 км² площі водозбору. Розподілені вони по території нерівномірно. Особливо недостатньо забезпечені спостереженнями за опадами високогірні райони, оскільки пункти вимірювань розташовані в основному на місцевості до висот 500...560 м..

Точність прогнозних розрахунків залежить не тільки від якості вхідної метеорологічної інформації та математичної моделі, а й від точності просторового оцінювання метеорологічних величин. З цією метою виконаний розподіл площ водозборів за висотними зонами на основі картографічних матеріалів(додаток). При цьому отримані дані співставлялись з відповідними даними, які зустрічались у публікаціях. Таким чином, середні по часткових площах і висотних зонах значення метеорологічних величин обчислювались залежно від питомої ваги задіяних станцій (постів), тобто за рівняннями:

$$\bar{S}(t) = \sum_{i=1}^{n_m} (k_{x,i} \bar{S}_i(t)) \quad (5)$$

де $\bar{S}(t), \bar{S}_i(t)$ – значення величин, відповідно середні до площі (висотній зоні) і в пункті вимірювання на час;

$n_1...n_m$ – кількість пунктів спостережень за величиною; $k_{x,i}$ – розрахунковий коефіцієнт величин S в пункті i. Для висотних зон, у межах яких спостереження відсутні, значення $k_{x,i}$ визначається шляхом лінійної інтерполяції.

Крім цього, оскільки вимірювання зволоження ґрунту в гірській частині водозбору пов'язане з великими труднощами, то ми прийшли до висновку, що доцільно інтенсивність зміни зволоження ґрунту розраховувати безперервно, починаючи з кінця попереднього паводку або ж із весняного періоду за розрахунковими залежностями, а в межах водозбору осушувальної системи проводити вимірювання вологості ґрунту та рівнів води в каналах і коректувати розраховані величини. Таким чином на початок паводку ми будемо мати найбільш достовірні дані про передпаводкове зволоження водозбору.

Важливим питанням при розробленні методик прогнозування стоку є вибір розрахункового інтервалу. Тут приходиться враховувати точність описання ходу стоку, особливо під час підйому. Внаслідок інтенсивної реакції водозборів на випадючі опади, для гірських водозборів площами 500...1000 км² розрахунковий інтервал повинен складати не більше 1...3 годин (74). Виходячи з можливості отримання інформації, прийнятий розрахунковий інтервал, який дорівнює трьом годинам. При такому допущенні забезпечується описання ходу стоку в замикаючих створах досліджуваних водозборів з точністю $\pm 8...12\%$.

Без таких оцінок важко судити про стійкість параметрів математичних моделей і прогнозних залежностей, а також оцінити реальну можливість підвищення точності розроблених методик.

При затопленні території в нижньому б'єфі, включаючи гідродинамічну аварію (хвиля прориву), підтоплення та заболочення у верхньому б'єфі в загальному випадку оцінюють зону затоплення і гідродинамічні параметри потоку:

- максимальні значення глибини і швидкості потоку в зоні катастрофічного затоплення;
- час від початку аварії до приходу в дану точку місцевості проривної хвилі;
- тривалість затоплення;
- межі зони катастрофічного затоплення.

Розрахунок проривного паводку є технічною задачею річкової гідравліки і здійснюється одним з методів таких розрахунків, зокрема, методами математичного моделювання з використанням одновимірних або двовимірних рівнянь Сен-Венана.

Як початкові дані для побудови моделі використані: зйомка дна, здійснена методом гідролокаційного зондування; берегова і заплавна частини, оцифровані з карт. Гідрологічні початкові дані були отримані для мінімальних витрат з натурних вимірювань, проведених в 2008 році., для максимальних - за даними спостережень за період з 1998 по 2001 рр.

Двовимірну кінематичну хвилю можна представити у вигляді [9]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = R - I, \quad (6)$$

$$Q_x = \frac{1}{n} \frac{I_x}{\sqrt{|grad\eta|}} h^{\frac{5}{3}}, \quad (7)$$

$$Q_y = \frac{1}{n} \frac{I_y}{\sqrt{|grad\eta|}} h^{\frac{5}{3}}, \quad (8)$$

де h – глибина потоку; x, y – просторові координати; Q_x, Q_y – витрати води на одиницю ширини потоку відповідно в напрямку осей x і y ; R – інтенсивність опадів; I – інтенсивність інфільтрації; n – коефіцієнт жорсткості Манінга; I_x, I_y – нахили поверхні в напрямку осей x і y ; η – висотна відмітка поверхні водозбору.

Для числового інтегрування системи (6)-(8) використаний метод розщеплювання кінцеворізничною схемою [9].

Математичне представлення на основі рівнянь Сен-Венана, які описують перенесення частинок наносів і рівняння деформацій дна можна представити у вигляді:

$$\int_U 0.5 \lambda \left| \vec{Q} \right| \vec{Q} \cdot h^{-2} dU + \int_U gh \nabla z dU = 0, \quad (9)$$

$$\int_U \frac{\partial h}{\partial t} dU + \oint_{\sigma} Q_n d\sigma = 0, \quad (10)$$

де U – область інтегрування на площині декартових координат x, y (m^2); σ – границя області інтегрування (периметр); t – час; \vec{Q} – вектор максимальних видатків води; Q_n – проекція \vec{Q} на нормаль; z – відмітки дна; h – глибина потоку; \vec{Q}/h – вектор середньої по глибині швидкості потоку; g – прискорення вільного падіння; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя ($\lambda = 2gn^2h^{-1/3}$, де n – коефіцієнт жорсткості).

Дискретизація двохвимірних рівнянь є неявною схемою кінцевих об'ємів [8]. Для оцінки гідрографа переливу проводиться розрахунок рівневого режиму верхнього б'єфу, як правило, за допомогою балансової моделі верхнього б'єфу або одновимірних рівнянь Сен-Венана, при детальній оцінці збитку – за допомогою двовимірних рівнянь Сен-Венана.

Висновки

При числовому моделюванні використано трикутну сітку нерегулярної структури, що надасть можливість більш детально відобразити процеси, які проходять в місцях складних потоків, а саме поблизу гідротехнічних споруд. Для моделі було виділено русло річки і дамби обвалування. Калібрування проводилося таким чином. Визначався коефіцієнт жорсткості для руслової частини. В якості граничних умов беремо мінімальні витрати води на вході і рівні на виході. Далі визначають коефіцієнт жорсткості для заплавної частини.

При дослідженні розповсюдження паводку по усьому басейні річки, який містить ряд приток, з метою вивчення можливості створення моделі затоплень в низинах річки можна розглядати довгі б'єфи, і деколи – короткі. Це веде до потреби змінювати планові і вертикальні масштаби моделей. Тому варто застосувати для моделей подібність середніх характеристик потоку: витрат води, середніх швидкостей, глибин, поздовжніх і поперечних перепадів рівнів, а при обмеженні границь деформацій геометричних масштабів, а також наближена подібність середніх по глибині швидкостей потоку.

У випадку виконання прогностичних розрахунків для великих територій, моделі дозволяють здійснювати обчислення по часткових площах і скласти карти ізоліній об'ємів стоку паводку, що має значну практичну цінність в масштабі водозбірного басейну. Таким чином, при використанні цих моделей для обчислення дощового стоку обмежених за площею водозборів, є можливість визначення параметрів, які його характеризують.

ЛІТЕРАТУРА

1. ua-REPORTER.com
2. Корень В.И., Кучмент Л.С. Математическое моделирование формирования дождевого потока // Труды IV Гидрологического съезда. - Л.: Гидрометеоздат, 1976. - С. 199-207.
3. Соседко М.Н. Особенности моделирования процессов формирования тало-дождевого стока на горном водозборе // Труды УкрНИИ Госкомгидромета. – 1987. – Вып. 200. – С. 3-15.
4. Соседко М.Н. Особенности применения математической модели формирования дождевого стока талых и дождевых вод // Метеорология и гидрология. – 1967. - №12. – С. 50-57.
5. Денисов Ю.М. Численное моделирование процесса стока горных рек // Международный симпозиум по паводкам. – Л.: Изд-во ГГИ, 1967. – С. 38-47.
6. Соседко М.Н. Из опыта идентификации математической модели формирования дождевого стока на горных водозборах // Труды УкрНИГМИ. – 1985. – Вып. 201. – С. 40-55.
7. Соседко М.Н. Многолетние характеристики максимальных расходов воды дождевых паводков рек бассейна Днестра // Труды УкрНИГМИ. – 1973. – Вып. 123. – С. 64-77.
8. О.І.Лук'янець, М.М.Сусідко Комплексна басейнова система прогнозування паводків у Закарпатті : методична та технологічна база її складових // Наук. праці УкрНДГМІ, 2004, Вип. 253
9. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. Физико-математические модели. – М.: Наука, 1983. – С. 61-178.
10. Чіпак В.П., Мельник Т.П. Система протипаводкових заходів у басейні р.Боржава. – Рівне: Волинські обереги, 2008. –202 с.
11. Мельник Т.П. Элементы математического та просторового моделювання процесів танення снігу та дослідження паводкових ситуацій на водозборах меліоративних систем басейну ріки Боржава. // Materiały II Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania nauki i techniki – 2007». T. 13. Rolnictwo. Chemia i chemiczne technologie. Ekologia. Geografia i geologia.: Przemysl. Nauka i studia – S.77-82.
12. Мельник Т.П. Элементы математического та просторового моделювання процесів формування дощового стоку та прогнозування паводкових ситуацій на водозборах меліоративних систем басейну ріки Боржава. // Materiały IV mezinárodní vědecko – praktická konference “Klíčové aspekty vědecké činnosti –2008” –Díl 9. Matematika. Fyzika. Moderní informační technologie: Praha. Publishing House “Education and Science” s.r.o. – S.37-41.