

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЇ ЯК ФАКТОР НАУКОВОГО ПІЗНАННЯ**

На основі вивчення процесів формування паводків і створення басейнових прогностичних систем розглядаються завдання математичного моделювання стоку воду, системний підхід до його застосування та розвиток наукового пізнання при цьому. Викладено значення математичного моделювання як загальнонаукового методу сучасного дослідження та пізнання.

Формування річкового стоку – це складний процес, зумовлений впливом і взаємодією багатьох природних чинників. Розрахунок і прогнозування режиму річок і його характеристик (висоти, об'єму, перебігу у часі) завжди вимагали належної уваги. Для вирішення цих практичних завдань з успіхом застосовується математичне моделювання процесів формування стоку, яке нині є пріоритетним напрямком у розвитку теоретичної та практичної гідрології.

Така увага до математичного моделювання процесів формування стоку води пояснюється тим, що цей напрямок досліджень дозволяє вдосконалювати існуючі та створювати нові практичні методи гідрологічного прогнозування та обчислення стоку. Високої інформативної здатності набувають створювані на засадах математичного моделювання прогностичні системи – просторові, басейнові, безперервні у часі.

Моделювання дає також великі принципові можливості подальшого вивчення сутності, пізнання складових явищ, які відбуваються на водозборах річкових басейнів.

Тому розгляд ролі математичного моделювання в гідрометеорології у зв'язку з філософськими аспектами методів наукового пізнання сприятиме подальшому розвитку цього комплексу наук.

### **Застосування математичного моделювання в гідрометеорології**

На сучасному етапі розвитку теоретичної та прикладної гідрометеорології важливого значення набуло математичне моделювання процесів, які відбуваються в атмосфері та гідросфері.

Одна з важливих галузей гідрометеорологічних досліджень – це вивчення та математичне моделювання процесів формування річкового стоку. Коли мова йде про річковий стік, то, таким чином, розглядаються природні процеси, що відбуваються на водозборі під впливом метеорологічних і гідрологічних чинників. Кінцевою метою дослідження у цьому напрямку є вдосконалення та створення нових практичних методів прогнозування та розрахунку характеристик гідрологічного режиму, передовсім під час паводків і весняної повені, а також оцінювання впливу господарських заходів на водні об'єкти [1, 2, 3, 6-8].

Статистичні та фізико-статистичні методи досліджень набули свого часу значного поширення в гідрології [4]. Використання апарату кореляційного та регресійного аналізів сприяло вирішенню різного роду прикладних задач. Та одночасно постали труднощі й обмеження, притаманні цій класичній методології. Виявився розрив між обсягом теоретичних знань про формування стоку води та кінцевими результатами наукових досягнень, який закладено в жорсткі рамки регресійних схем. На засадах останніх неможливо здійснити вирішення нових завдань, які ставить практична діяльність перед інженерною гідрологією.

Реакцією на ці труднощі в математичному описі процесів формування стоку постало опрацювання нових підходів, які ґрунтуються на їх математичному моделюванні.

Під математичним моделюванням процесів формування стоку води розуміється обчислення його перебігу в замикальному створі водозбору при заданому надходженні води на річковий басейн під час дощів чи сніготанення. У такому разі стік води розглядається як функція часу; у графічному поданні це буде хронологічний графік зміни витрат води (гідрограф).

Обчислення перебігу стоку води в часі під впливом гідрометеорологічних чинників потребує застосування динамічних детерміністичних моделей, в яких на вході величини задаються однозначно у вигляді функцій і отримуються однозначні функції (перебіг стоку) на виході. Таким чином, водозбір розглядається як динамічна система. Для побудови гідрографа потрібно знати основні характеристики ландшафтних властивостей водозбору. При моделюванні дощових паводків звичайно використовуються метеорологічні дані: інтенсивність опадів, температура та вологість повітря, швидкість вітру. Модельні

розрахунки перебігу стоку під час весняного водопілля потребують також наявності відомостей про сніговий покрив (запаси води у снігові, щільність снігу, товщина льодової кірки та глибина промерзання ґрунту).

Оскільки формування річкового стоку відбувається під дією метеорологічних умов, сукупність усіх його процесів розглядається як гідрометеорологічна система. При цьому це складна система [5]. Її складність визначається при моделюванні двома сторонами:

- розглядом складових загального процесу формування стоку води;
- врахуванням просторового розподілу по території водозбору гідрометеорологічних умов.

У подальшому складну систему формування річкового стоку будемо іменувати “імітаційна система” [6, 8, 12-14]. Таким чином, у нашому визначенні імітаційна система – це модель складної системи формування річкового стоку. Вона являє собою багаторівневу конструкцію із взаємопов’язаних елементів (складових), які об’єднані в підсистеми. Останні подано у вигляді просторових об’єктів – часткових площ і висотних зон, в яких діють математичні моделі процесів формування стоку. При створенні імітаційних систем, крім звичайних етапів розвитку математичного моделювання, виникає потреба: 1) конструювання просторових об’єктів (підсистем), які діють як окремі математичні моделі; 2) сполучення підсистем та організація їх взаємодії.

Одним із прикладів просторової структури імітаційної системи може бути рис. 1, де просторовими об’єктами виступають часткові басейни та часткові площі. При моделюванні річкового стоку, наприклад дощового чи весняного стоку, математичні моделі діють на кожній частковій площі зі своїми параметрами за відповідних гідрометеорологічних умов, які складаються на цьому просторовому об’єкті [3, 6-8, 12-14].

При опрацюванні імітаційної системи та моделюванні річкового стоку одночасно вирішуються задачі аналізу та синтезу [9]. Задачі аналізу застосовуються при розгляді окремих процесів (елементів) формування стоку як складових загального процесу. Наприклад, у процесі формування дощового стоку відбуваються випаровування води з поверхні водозбору, інфільтрація її в ґрунт і підґрунтя, утворення поверхневого, підповерхневого та ґрунтового стоку. Тому постає необхідність досліджувати окремі елементи, порівнюючи дані їх вимірювань на гідрометеорологічній мережі з результатами обчислення за допомогою

часткових математичних моделей перед тим, як створювати всю систему шляхом вирішення задач синтезу.



Рис. 1. Складові просторової структури імітаційної системи формування річкового стоку

Слід зауважити, що дослідження складових імітаційної системи формування річкового стоку, як показав досвід [3, 5-8, 12], дозволяє ефективно оцінити кожний елемент підсистеми чи системи. Цим самим стає можливою перевірка дієвості всієї системи, тобто відповідності структури та динаміки реальній системі.

### **Розвиток наукового пізнання при математичному моделюванні річкового стоку**

Деякі моменти розвитку наукового пізнання розглянемо на прикладі математичних моделей формування дощового та сніго-дощового стоку, які застосовуються на практиці в системах прогнозування паводків і весняної повені в Карпатах [6-8, 12-14].

Розмаїття умов формування стоку в гірській місцевості вимагає для прогнозування його перебігу необхідності виділення в річкових басейнах просторових структурних об'єктів (часткових площ, висотних зон), в яких спостерігається відносно однорідний хід природних процесів. Таким чином, опис процесів формування стоку в басейні являє собою багаторівневу імітаційну систему, подану у вигляді паралельних і/або послідовних підсистем, у якій взаємодіють водні маси, що надходять із окремих часткових площ і висотних зон [6, 12, 14].

Методична база імітаційних систем ґрунтується на застосуванні математичних моделей дощового і сніго-дощового стоку як складових цих систем [7, 8, 12]. Отже, в імітаційних системах моделі діють на кожній частковій площі та висотній зоні зі своїми параметрами та відповідними метеорологічними даними, що дозволяє враховувати просторову неоднорідність водоутворення на водозборі.

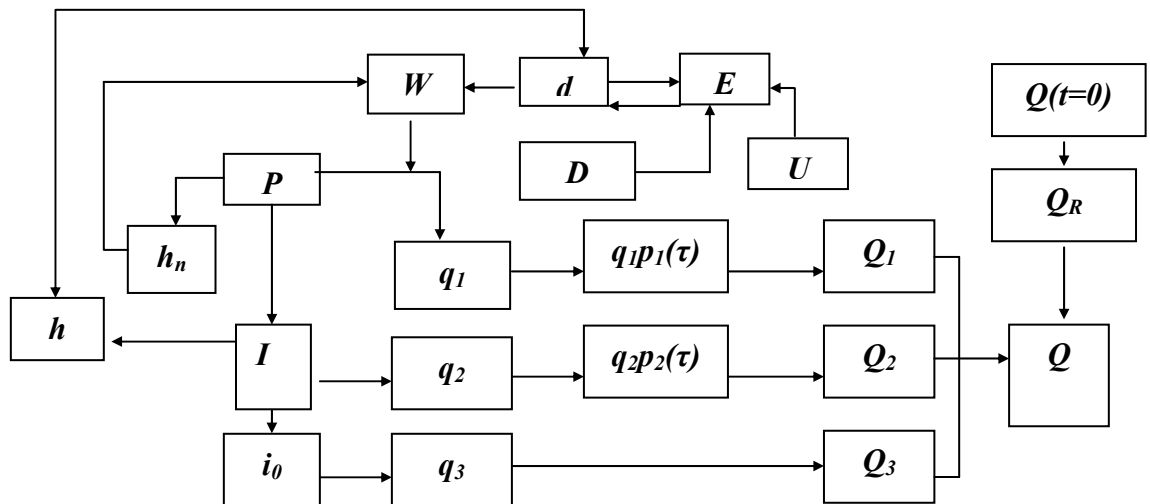
На рис. 2 показано структуру математичної моделі дощового стоку [7]. Це динамічна концептуальна модель, яка подається трьома умовними місткостями, де визначається формування поверхневого, підповерхневого та ґрунтового стоку. В імітаційній системі ця модель працює на кожній частковій площі з певними, визначеними для цієї площі параметрами.

У процесі формування дощового стоку є можливість реєструвати (вимірювати) певні дані. Це інтенсивність опадів ( $P$ ), дефіцит вологості повітря ( $D$ ), швидкість вітру ( $U$ ). Ці величини подаються, звичайно, у вигляді часових функцій. Відома також витрата води на початковий момент  $Q(t=0)$ . Це буде пізнана інформація про досліджуваний об'єкт.

На початковому етапі обчислення перебігу стоку (до моделювання) було застосовано його залежність від інтенсивності опадів та отримані лише наближені результати через відсутність необхідної інформації щодо формування стоку. Проте іншої інформації ми й не будемо мати, якщо не застосуємо наукові дослідження до пізнання більш детальних процесів формування стоку. Для оцінювання випаровування ( $E$ ) з поверхні водозбору застосовуються добре відпрацьовані способи [7]. У той же час такі процеси, як: інтенсивність інфільтрації ( $I$ ), поверхневого затримання ( $h$ ), поверхневого ( $q_1$ ), підповерхневого ( $q_2$ ) і ґрунтового ( $q_3$ ) водоутворення – визначаються лише в процесі моделювання. Хоча теоретично вони добре вивчені, а діапазони коливання їх значень відомі. Для конкретного водозбору названі вище дані, отримані шляхом багатоваріантного моделювання – це вже пізнана інформація про перебіг формування стоку, яка наближає нас до більш детального пізнання його процесів [9]. А спостереження за гідрологічним режимом у замикальному створі водозбору дають матеріал для перевірки теоретичних положень, закладених у моделі (див. рис. 2).

Якраз дослідження ефекту стікання з гірських водозборів Карпат поверхневого та підповерхневого стоку докорінно змінило рівень пізнання процесів формування паводків у цьому регіоні. У Карпатах близько розташований до поверхні відносний водоупір, перекритий

уламковим матеріалом. У цьому шарі за рахунок води, що просочилася під час дощу, формується підповерхневий стік. Швидкість стікання цієї води в 3-5 разів менша, ніж поверхневого стоку. Внаслідок цього паводкова хвиля формується в основному за рахунок накладання двох хвиль, неоднакових по фазі та зсунутих у часі.



$P$  - інтенсивність опадів;  $D$  - дефіцит вологості повітря, гПа;  $U$  - швидкість вітру м/с;  $W$  - загальне зволоження водозбору, мм;  $d$  - дефіцит вологості ґрунту, мм;  $E$  - інтенсивність випаровування, мм;  $h_n$  - інтенсивність поверхневого затримання води;  $h$  - інтенсивність затримання води в ґрунті, мм;  $I$  - інтенсивність інфільтрації, мм;  $i_0$  - інтенсивність фільтрації води, мм;  $q_1, q_2, q_3$  - інтенсивність поверхневого, підповерхневого і ґрунтового водоутворення, мм;  $p_1(\tau), p_2(\tau)$  - функції впливу поверхневого і підповерхневого стоку;  $Q_1, Q_2, Q_3$  - витрати поверхневого, підповерхневого та ґрунтового стоку, м<sup>3</sup>/с;  $Q_R$  - витрата води внаслідок виснаження запасів води, що знаходилися в річковій мережі на початок розрахункового періоду, м<sup>3</sup>/с;  $Q$  - витрата води із часткової площі водозбору, м<sup>3</sup>/с.

Рис. 2. Структура паралельної підсистеми математичної моделі ДОЩ-3

Математичне моделювання дощових паводків із застосуванням методу декомпозиції [8] сприяло більш глибокому пізнанню особливостей водоутворення поверхневого та підповерхневого стоку і дозволило кількісно описати ці процеси, що, у свою чергу, уможливило значно точніше прогнозування перебігу та висоти паводків.

Вище наведено один із прикладів того, як математичне моделювання дозволяє досліджувати складні системи та забезпечує отримання інформації, необхідної для більш глибокого пізнання й кількісного опису процесів формування дощового стоку. Отже, завдяки

цим дослідженням відбувається зворотний зв'язок [9] – збільшується обсяг пізнаної інформації (рис. 3).

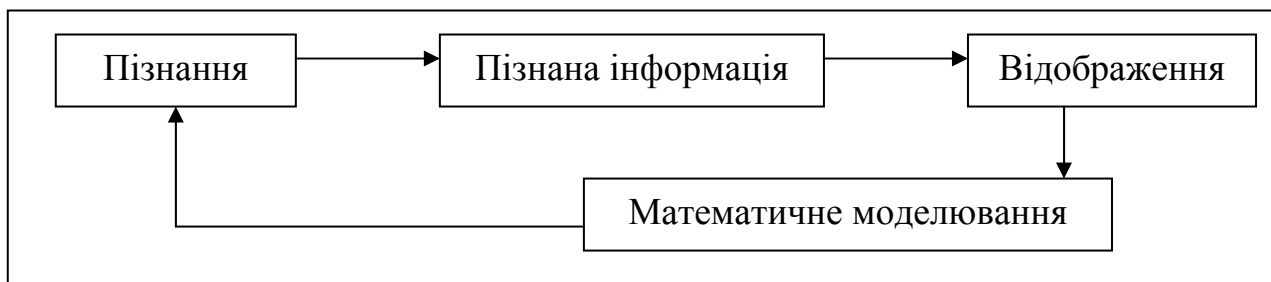


Рис. 3. Процес розвитку пізнання

Слід зазначити, що формування дощового стоку, згідно з поданою схемою, включає відносно небагато взаємодіючих елементарних процесів. Більш складну систему представляє модель формування сніго-дощового стоку [12, 14], де додатково взаємодіють процеси, пов'язані з визначенням часових функцій наступних величин, які або не вимірюються зовсім, або ж спостереження за ними здійснюються нерегулярно, а саме: щільність снігового покриву, вологемність снігу, інтенсивність танення снігу, замерзання талої води, запаси води у снігові, ступінь покритості водозбору снігом, затримання талої води в снігові, глибина промерзання та відтавання ґрунту.

Вищезазвані моделі дощового і сніго-дощового стоку універсальні стосовно видів стоку, тобто вони застосовуються до будь-якого водозбору. А регіональні чи ландшафтні особливості, які впливають на формування паводків і повеней, враховуються шляхом параметризації. У процесі модельних експериментів оцінюються оптимальні для кожного річкового басейну чи його часткових площ параметри розрахункових виразів, закладених у моделі. Ці оптимальні параметри слугують у подальшому при практичному використанні прогностичних систем. Таким чином, здійснюється більш детальний опис окремих процесів формування стоку, що збільшує обсяг пізнаної інформації щодо структури моделі та її параметрів.

### **Висновки**

В останні десятиріччя математичне моделювання з успіхом застосовується в багатьох галузях людської діяльності. Це і дослідження природних, передовсім стихійних явищ, охорона довкілля, економіка,

медицина, управління водними ресурсами, виробничими та іншими процесами. Такий перелік можна продовжити.

Як загальнонауковий метод сучасного дослідження та пізнання, математичне моделювання набуло першочергового значення. Воно значно розширює можливості наукового пізнання, оскільки за його допомогою досліджуються такі процеси, властивості й характеристики явищ (об'єктів), безпосереднє вивчення яких неможливе або недоцільне.

У результаті математичне моделювання дозволяє отримати принципово нові дані про досліджуваний об'єкт. Особливо виразно проявляється така можливість при дослідженні складних систем, якими є переважна більшість природних явищ. До таких складних систем також належить формування річкового стоку, яке включає взаємодію комплексу процесів, що відбуваються на водозборі та річковій мережі протягом певного часу – від випадіння дощу чи сніготанення до проходження водних мас через замикальний створ річки, що вивчається.

Наукове пізнання об'єкту дослідження – це багаторазовий і багатоетапний процес, у результаті якого знання стають більш детальними, а отже, і більш об'єктивними. Одночасно відбувається вдосконалення структури моделі, пов'язане з більш докладним фізичним описом окремих процесів на підставі збільшення обсягу пізнаної інформації про досліджуваний об'єкт.

Історія розвитку гідрології та поетапне вдосконалення методології прогнозування річкового стоку відображають процес пізнання в цій науковій галузі, підтверджуючи те, що математичне моделювання – єдиний метод, який здатний забезпечити дослідження складних систем [1, 3, 6-8, 12-14].

Оскільки наукове пізнання – це цілеспрямований процес, він вирішує пізнавальні завдання, визначені їхніми цілями. До них, крім потреб розвитку самого наукового пізнання, належать також потреби практичної діяльності в процесі розвитку суспільства. Тому ступінь деталізації пізнавального завдання через удосконалення структури математичних моделей (імітаційних систем) визначаються необхідною точністю кінцевих результатів моделювання. Таким чином, хоча завдання математичного моделювання – це знаходження шляхів і методів найбільш адекватного відображення структури та поведінки досліджуваного об'єкта, проте практика встановлює певні межі в досягненні цих цілей, виходити за які не завжди доцільно. Наприклад, ускладнення структури

математичних моделей та імітаційних систем формування річкового стоку, пов'язані з більш досконалим докладним описом окремих процесів, обов'язково призводить і призвело до збільшення обсягу необхідної інформації, внаслідок чого збільшилася кількість параметрів. Проте величини гідрометеорологічних спостережень ніколи не можуть вважатися такими, які мають абсолютну точність, особливо щодо їх перебігу в часі та розподілу по території. Таким чином, навіть за виключно досконалої математичної моделі точність кінцевих результатів моделювання визначається точністю вхідної інформації.

Ефективним кроком у розвитку математичного моделювання на сучасному етапі вважається створення універсальних математичних моделей. Такі моделі відтворюють не один об'єкт, а певний клас досліджуваних, аналогічних за структурою та процесами, об'єктів. До них належать моделі формування дощового та тало-дощового стоку. Використання цих моделей для опису формування річкового стоку з конкретного річкового басейну потребує ідентифікації параметрів, які визначаються ландшафтними умовами. Таким чином, конкретна математична модель досягається не зміною опису моделюючого алгоритму, а шляхом параметризації універсальної моделі.

Закінчуючи розгляд питання щодо ролі математичного моделювання як методу наукового пізнання, слід наголосити на наступному. Потреби практичної діяльності визначають напрямок розвитку наукового пізнання, ставлять перед ним актуальні проблеми, які необхідно вирішувати, зумовлюють темпи розвитку тих чи інших наук. У своєму розвитку наукове пізнання проходить декілька ступенів, які відрізняються мірою проникнення в сутність об'єктивного світу, формою та методами пізнання. І якраз математичне моделювання є важливим надбанням, яке забезпечує сучасний розвиток наукового пізнання.

\* \*

*На основании изучения процессов формирования паводков и создания бассейновых прогностических систем рассматриваются задачи математического моделирования речного стока, системный подход к его применению и развитие научного познания при этом. Изложено значение математического моделирования как общенаучного метода современного исследования и познания.*

\* \*

1. *Виноградов Ю.Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока – Л.: Гидрометеиздат. – 1988. – 312 с.
2. *Грушевский М.С.* О математическом моделировании процесса формирования речного стока // Тр. ГГИ. –1973. – Вып. 211. – С. 3-59.
3. *Корень В.И.* Математические модели в прогнозах речного стока. – Л.: Гидрометеиздат. – 1991. – 200 с.
4. *Попов Е.Г.* Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. – Л.: Гидрометеиздат. – 1983. – 396 с.
5. *Саркисян С.А., Голованов Л.В.* Прогнозирование развития больших систем. – М.: Статистика. – 1975. –192 с.
6. *Соседко М.Н.* Пример имитационной системы формирования стока в речном бассейне // Тр. УкрНИИ Госкомгидромета. – 1987. – Вып. 222. – С.61-69.
7. *Соседко М., Димитров Д., Кочелаба Е., Янков В.* Применение математических моделей в задачах расчета и прогноза дождевого стока (методическое руководство). – София-Киев.-1990. – 118 с.
8. *Сусідко М.М.* Математичне моделювання процесів формування стоку як основа прогностичних систем // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. Наук. збірник Київ. нац. ун-та, Т.1. – 2000. – С. 32-40.
9. *Філософія: Навч. посібник / І.Ф.Надольний, В.П.Андрущенко, І.В.Бойченко та ін. ; За ред. І.Ф.Надольного – К.: Вікар, 2000. – 624 с.*
10. *Eagleson P.S.* Dynamic hydrology. N.Y., 1970, 462 p.
11. *Linsley R.K., Kohler M.A., Paulhus J.L.H.* Applied Hydrology. – N.Y.-1949. – 760 p.
12. *Luk'yanets O., Sosyedko M.* Die Möglichkeiten der langfristigen Frühlingsabflusvorhersagen im Gebirgsflußbecken von der Theiß mit schrittweiser Berichtigung // XX.Konferenz d. Donauländer. – Bratislava, 2000. – S.16 (Compact disc).
13. *Luk'yanets O., Sosyedko M.* Die Struktur des Informations – und Vorhersagesystems im Flußbecken der Theiß (in den Grenzen der Ukraine) // XX.Konferenz der Donauländer. – Bratislava, 2000. – S. 17 (Compact disc).
14. *Sosedko M.N.& Kochelaba E.I.* Modelling snowmelt-induced processes in a mountain river basin given standard hydrometeorological data // JANS Publ. – Budapest, 1986. – No.155. – P. 83-91.