

М.В. ЗАКОРЧЕВНИЙ*Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України та МНС України, м. Київ***ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ РІЧКОВИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМИ «QUAL2K» (НА ПРИКЛАДІ ВЕРХНЬОЇ І СЕРЕДНЬОЇ ТЕЧІЇ р. ДНІСТЕР)**

Виконано аналіз принципів сегментації річкової системи та безпосереднього моделювання річкового стоку програмою «Qual2K», розглянуто можливість її застосування для моделювання аварійних ситуацій, що можуть становити загрозу гідроекологічному стану р. Дністер, в українській частині басейну якого зосереджено велику кількість хімічних підприємств.

Вступ

Дністер – друга за величиною після Дніпра річка України – має басейн у формі дуже витягнутого, зігнутого посередині овалу завдовжки близько 700 км при середній ширині 120 км. Основною особливістю гідрографічної сітки басейну Дністра є відсутність значних приток: в межах України налічується лише 6 річок, що належать до середніх; довжина кожної не перевищує 250 км. Переважають малі річки завдовжки до 10 км; їх загальна довжина (32,2 тис. км) становить 94% від сумарної довжини всіх річок в українській частині басейну. Річкова сітка в басейні Дністра розвинена нерівномірно. Вона найгустіша (понад 1 – 1,5 км/км²) у карпатській частині басейну, менша – на лівобережжі (0,5 – 0,7 км/км²) [1].

У верхній течії Дністер – це напівгірська річка, його глибока долина (80 – 100 м) тут часто має вигляд ущелини. Значна кількість приток у верхній течії Дністра відноситься до категорії гірських річок, а рівнинні притоки верхньої частини Дністра (переважно ліві), в свою чергу, характеризуються незначною довжиною. Все це зумовлює швидке добігання води до основного русла, особливо під час періодів підвищеної водності.

У верхній частині басейну Дністра розташована велика кількість підприємств, що виробляють або використовують у виробництві значні об'єми хімічних речовин (аміак, сірку, хлор, пестициди тощо), що можуть становити екологічну загрозу для водних систем. У разі виникнення аварійних ситуацій на вищезгаданих підприємствах може відбутися забруднення водотоків хімічними речовинами і транспортування їх вниз за течією. Адекватне реагування на подібну ситуацію вимагає чіткого уявлення про швидкість транспортування шкідливих речовин водотоком, яке можна представити у вигляді моделі.

Моделювання річкового стоку з використанням комп'ютерних технологій широко розповсюджене в розвинених країнах, які активно впроваджують сучасні методи водокористування та регулювання поверхневого стоку. Побудова правильної і репрезентативної моделі є визначальною для достовірності результатів моделювання. Першим важливим кроком на шляху до достовірного моделювання процесу поверхневого стоку є вибір способу побудови моделі.

Створення моделі річкової системи

Моделюванням називають дослідження об'єктів пізнання на їх моделях; створення і вивчення моделей реально існуючих предметів, явищ чи об'єктів, які проєктуються. В нашому випадку мова йде про створення моделі річкової системи і вивчення її гідравлічних і гідрологічних характеристик. Вірогідність моделювання процесів поширення хімічних речовин у водотоці напряму залежить від вірогідності моделі гідравлічних характеристик потоку. Різні програмні продукти, які надають змогу будувати модель річкової системи базуються на одному принципі: поділі річкової сітки на відрізки («reaches») із заданою довжиною та висотними відмітками початку і кінця відрізка,

побудова поперечних перерізів русла водного об'єкту із заданими гідравлічними характеристиками, інтерполяція морфометричних характеристик русла між зазначеними перерізами. Створена модель може прив'язуватися до системи координат або ж використовувати власну, відносну систему координат. В першому випадку модель є більш цінною, оскільки вона може бути інтегрована у різноманітні геоінформаційні системи (ГІС).

Програма моделювання якості води Qual2K: можливість використання для моделювання річкової системи верхньої та середньої течії Дністра

Програмне забезпечення «Qual2K», розроблене на замовлення Агентства з охорони довкілля США, позиціонується розробниками як «моделювальна структура для імітування якості води у річках та водотоках». Програма впроваджена в середовищі «Microsoft Windows», числові розрахунки запрограмовані у «Fortran 90». В якості графічного інтерфейсу користувача використовується «Excel».

Модель відображає річку як низку *відрізків*, які мають постійні гідравлічні характеристики (наприклад, похил, ширина дна тощо). Річка може розглядатись з притоками чи без них (рис. 1). У першому випадку притоки теж можуть поділятися на будь-яку кількість відрізків.

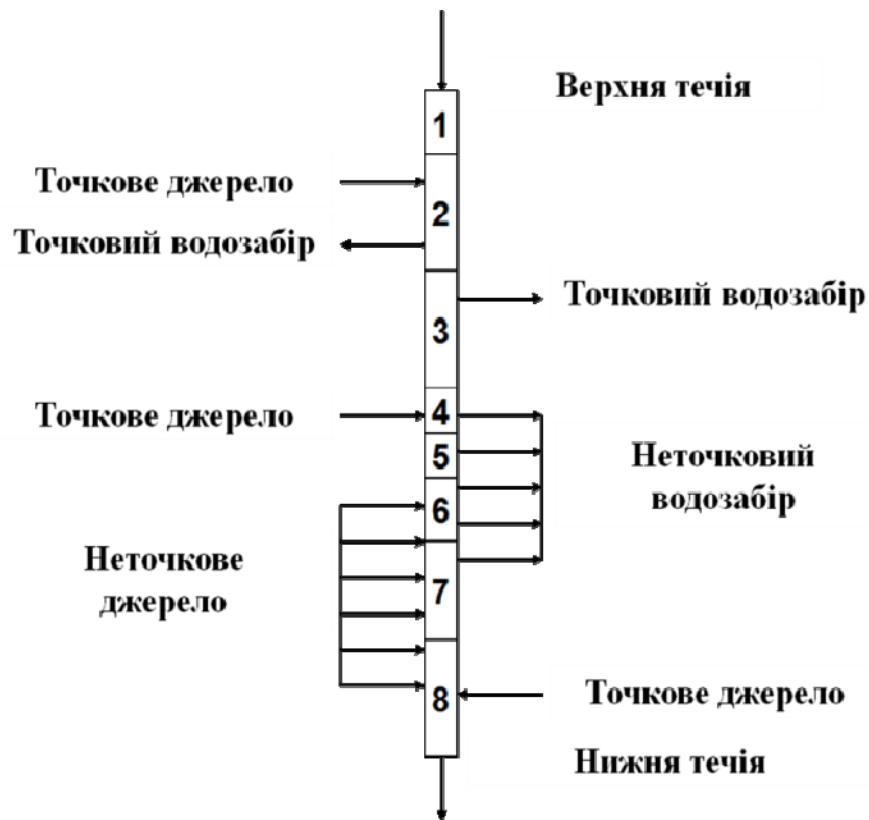


Рис. 1. Схема сегментації річки без приток у програмі «Qual2K»

В результаті, будь-який відрізок моделі може бути потім поділений на низку рівномірно розділених елементів (рис. 2). У програмі, що розглядається, елемент є базовою одиницею. Водний баланс потоку, що встановився, для кожного елементу моделі має наступний вигляд:

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{\Pi i} - Q_{Bi}, \quad (1)$$

де: Q_i – витрата води з елементу i до нижнього елементу $i+1$, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_{i-1} – приплив води з верхнього елементу $i-1$, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\Pi i}$ – загальний приплив води до елемента з точкових та неточкових джерел, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_{Bi} – загальна витрата води з елемента по точкових та неточкових водозаборах, $\text{м}^3/\text{с}$.

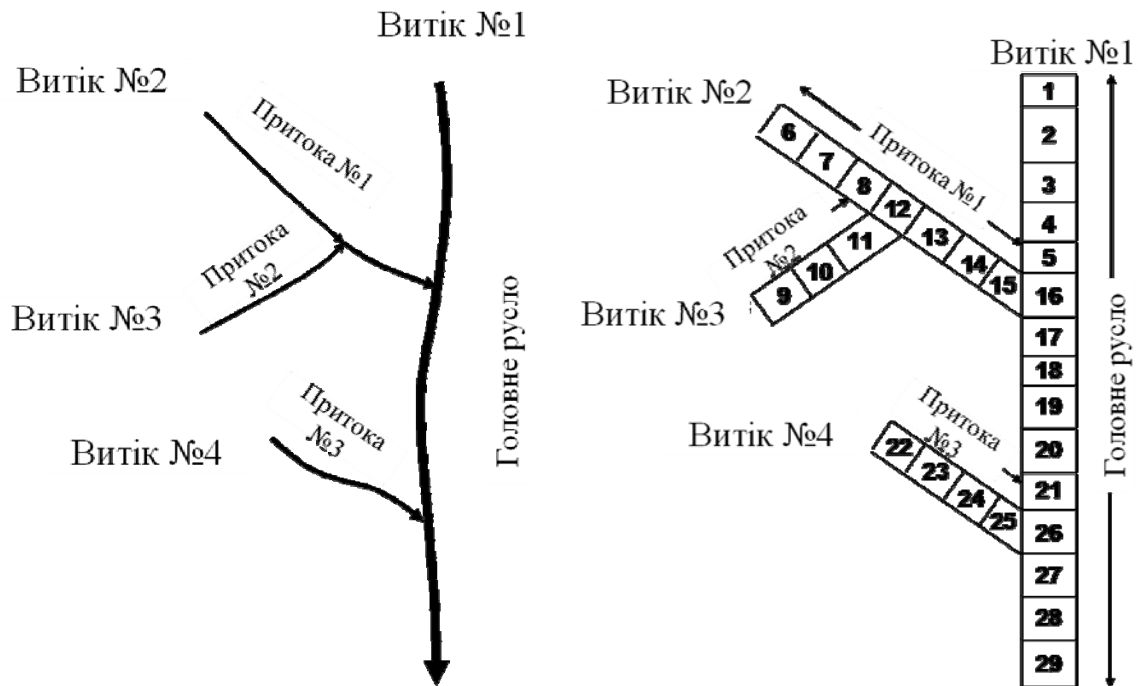


Рис. 2. Схема сегментації річки з притоками у програмі «Qual2K»

Таким чином, витрата води дорівнює притоку з верхнього елемента і притоку з джерел мінус втрати на водозабір в межах даного елемента (рис. 3).

Неточкові джерела та водозабори моделюються як лінійні, тобто величина їхнього впливу на баланс елемента розподіляється пропорційно їхній зазначеній довжині.

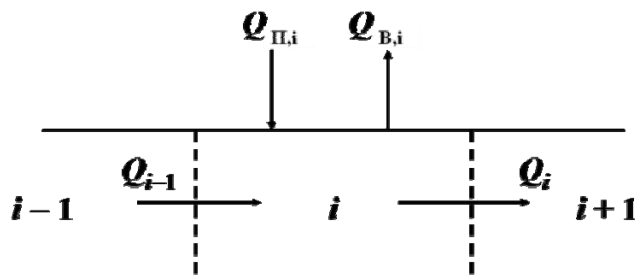


Рис. 3. Елемент водного балансу потоку

Після обрахування витрати для кожного елемента, глибина та швидкість потоку обраховуються одним з трьох способів: за допомогою водозливу, за допомогою кривої витрат та за рівняннями Меннінга. Програма обирає спосіб у такій послідовності:

- якщо вказані висота та ширина водозливу, використовується спосіб водозливу;
- якщо висота та ширина водозливу вказані як «0» і зазначені коефіцієнти кривої витрат, використовується спосіб кривої витрат;
- якщо жодний з вищезазначених параметрів не вказаний, програма використовує рівняння Меннінга.

У разі використання способу з водозливом, водозлив повинен міститися в кінці відрізка, що складається лише з одного елемента. Витрата водозливу в такому випадку і буде витратою води з даного відрізка [2].

Для використання другого способу необхідно мати криві зв'язку рівнів і витрат для кожного елемента (можна використовувати криві зв'язку рівнів і витрат гідропостів, що розташовані на відповідному відрізку ріки).

У разі відсутності штучних водозливів і емпіричних даних про зв'язок між рівнями і витратами води використовується рівняння Меннінга. Його суть полягає в тому, що кожний елемент окремого відрізка річки може бути схематично представлений у вигляді трапецеїдального каналу (рис. 4). За умов потоку, що встановився, рівняння Меннінга для вираження взаємозв'язку між потоком та його глибиною може використовуватися наступним чином:

$$Q = \frac{S_0^{1/2}}{n} \times \frac{A_c^{5/2}}{P^{2/3}}, \quad (2)$$

де: Q – витрата води, $\text{м}^3/\text{с}$; S_0 – похил дна, $\text{м}/\text{м}$; n – коефіцієнт шорсткості русла Меннінга; A_c – площа перерізу, м^2 ; P – змочений периметр, м .

Площа перерізу трапецеїдального каналу обраховується за формулою:

$$A_c = [B_0 + 0,5(S_{s1} + S_{s2})H]H, \quad (3)$$

де: B_0 – ширина дна, м ; S_{s1} , S_{s2} – похили сторін трапецеїдального каналу (рис. 4), $\text{м}/\text{м}$; H – глибина елемента, м .

Змочений периметр обраховується наступним чином:

$$P = B_0 + H\sqrt{s_{s1}^2 + 1} + H\sqrt{s_{s2}^2 + 1} \quad (4)$$

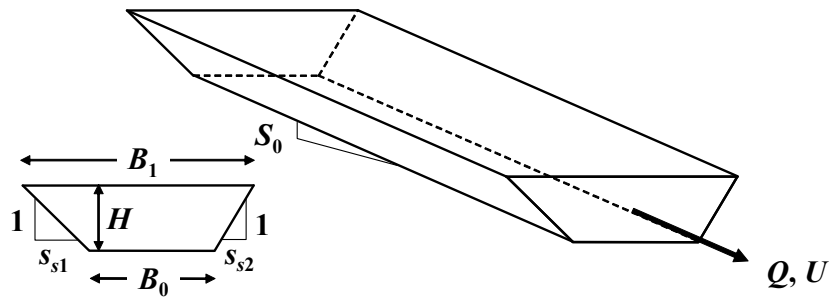


Рис. 4. Трапецеїдальний канал

Тепер, підставляючи формули (3) і (4) програма може багаторазово обраховувати глибину потоку:

$$H_k = \frac{(Qn)^{3/5} \left(B_0 + H_{k-1} \sqrt{s_{s1}^2 + 1} + H_{k-1} \sqrt{s_{s2}^2 + 1} \right)^{2/5}}{S^{3/10} [B_0 + 0.5(s_{s1} + s_{s2})H_{k-1}]}, \quad (5)$$

де $k = 1, 2, \dots, n$ (n – кількість ітерацій).

Також, у формулі (3) визначено площу перерізу, отже швидкість потоку визначається програмою за формулою:

$$U = \frac{Q}{A_c}. \quad (6)$$

Час добігання води для кожного елемента обраховується за формулою:

$$\tau = \frac{V}{Q}, \quad (7)$$

де: V – об'єм води в елементі, м^3 ; Q – витрата води в елементі, $\text{м}^3/\text{с}$ [2].

Таким, в загальних рисах, є спосіб моделювання річкового стоку програмою «Qual2K». Варто зазначити, що вище не розглянуто механізми, які використовує програма

для обрахунку поздовжньої дисперсії хімічних речовин у потоці, у викладеному огляді йдеться мова лише про гідравлічні аспекти.

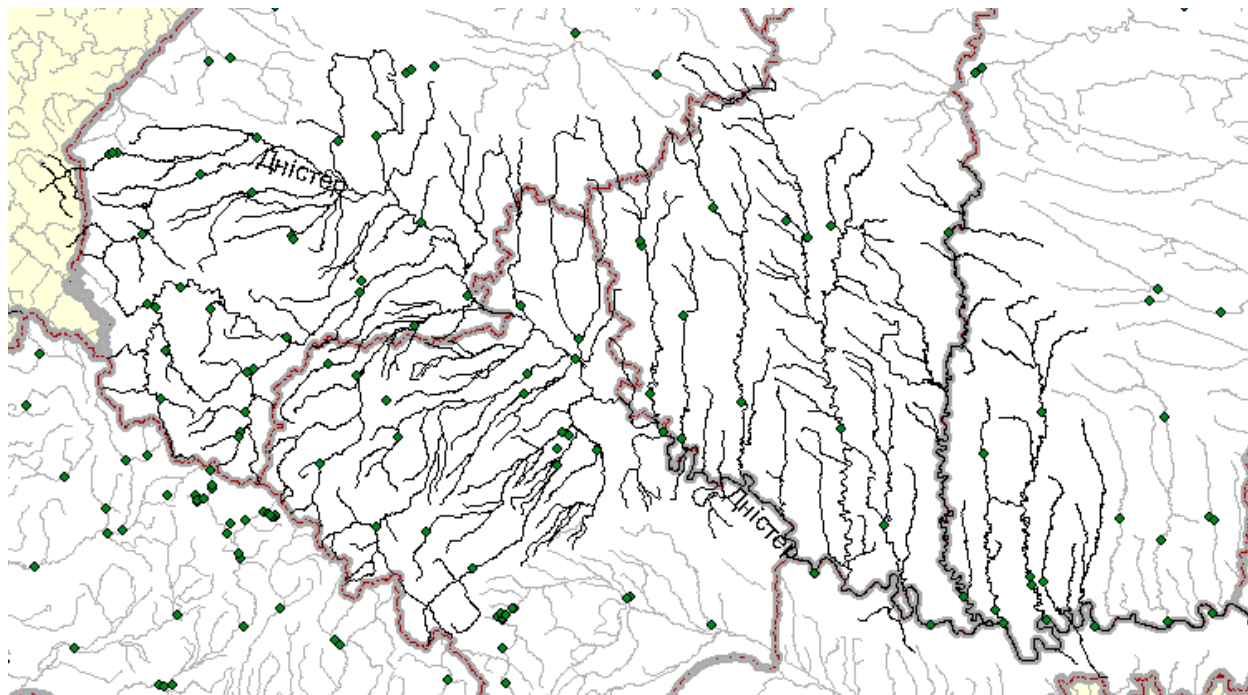


Рис. 5. План річкової системи Дністра у верхній та середній течії (Дністер та його притоки вище Дністровського водосховища виділені чорним. Пости Гідрометеорологічної служби позначені круглими символами)

Використання даної програми для моделювання річкової системи Дністра вище Дністровського водосховища є небажаним. З викладеної інформації очевидно, що вірогідну модель річкового стоку можна буде отримати лише за наявності детальних морфометричних даних хоча б по основним водотокам річкової системи Дністра. На рис. 5 наведено план річкової системи Дністра вище Дністровського водосховища з зазначеними пунктами мережі Гідрометслужби України.

Звивистість русла головної річки вимагає детальних морфометричних даних, а недостатня кількість постів спостережень (в порівнянні, наприклад, з басейнами річок Закарпаття) ускладнює можливість закладання в розроблювану модель достатньої кількості даних про гідрологічний режим водотоків. Слід зазначити, що схожі за призначенням програмні продукти (наприклад «HEC-RAS», розроблена для інженерних військ США) вимагають ще більше морфометричних характеристик для побудови достовірної моделі. Проте, використання програми «Qual2K» є доцільним при моделюванні саме процесів одноразового, аварійного поширення хімічних (забруднюючих) речовин у річковій системі. Отже, за наявності достатньої кількості вхідних даних для моделювання (в першу чергу, морфометричних характеристик русел основних річок), програма є надзвичайно актуальною для оперативного прогнозування поширення забруднюючих речовин у річковій системі. За відсутності ж достатньої кількості вхідних даних більш доцільним є використання моделей, що базуються на використанні ГІС-технологій.

Висновки

Програмний продукт «Qual2K», розроблений на замовлення Агентства з охорони довкілля США, є потужним засобом для моделювання процесів поширення хімічних речовин в річковій системі. Розглянуті основні принципи роботи програми в частині сегментації річкової мережі та моделювання гідравлічних процесів свідчать про високу вірогідність отримання репрезентативної моделі річкової системи досліджуваної річки (Дністер) за наявності детальних морфометричних характеристик русла не тільки головної річки, але й всіх основних приток. За існуючої ситуації, коли в країні загалом і в басейні Дністра зокрема скорочено кількість гідрологічних постів, побудована модель може не повною мірою адекватно відображати процеси транспортування хімічних речовин водотоком. З огляду на це, використання «Qual2K» для подібних цілей повинне супроводжуватися додатковими морфометричними вимірами і калібруванням результатів, що будуть отримані в процесі моделювання. Для реалізації подібного завдання доцільніше буде використовувати моделі, що базуються на використанні ГІС-технологій (наприклад, моделювання в середовищі «ArcGIS»).

1. Паламарчук М.М., Закорчевна Н.Б. Водний фонд України: довідковий посібник. – К.: Ніка-Центр, 2006. – С. 20.
2. Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA, 2008. – p. 9-16

М.В. Закорчевный

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ «QUAL2K» (НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕГО И СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р. ДНЕСТР)

Выполнен анализ принципов сегментации речной системы и непосредственного моделирования речного стока программой «Qual2K», рассмотрена возможность её применения для моделирования аварийных ситуаций, которые могут представлять опасность для гидроэкологического состояния р. Днестр, в украинской части бассейна которого сосредоточено большое количество химических предприятий.

M.V. Zakorchevnyi

GENERAL PRINCIPLES OF THE MODELLING OF RIVER SYSTEM WITH «QUAL2K» SOFTWARE (ON THE EXAMPLE OF THE UPPER AND MIDDLE STREAM OF DNIESTER)

The analysis of principles of the river system segmentation and modeling of river flow with «Qual2K» software is described. Usability for the modeling of emergency situations that may be dangerous for the hydroecological condition of the Dniester River (because of a number of chemical facilities that are located in its basin) is shown.