

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

(повне найменування закладу вищої освіти)

Гідрометеорології і екології

(повне найменування факультету)

Кафедра гідрології суші

(повна назва кафедри)

## Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти « магістр »

« Розрахунок трансформації паводків на р.Дністер від м. Могильов-Подільський до с.Грушка»

(тема кваліфікаційної роботи українською мовою)

« Calculation of the floods transformation on the Dniester River from the water gauging station (WGS) Mogilev-Podilskiy to Grushka»

(тема кваліфікаційної роботи англійською мовою)

Виконав: здобувач денної форми навчання спеціальності 103 Науки про Землю

(код, назва спеціальності)

Освітня програма Гідрологія і комплексне використання водних ресурсів

(назва)

Дигас Олександр Володимирович

(прізвище, ім'я, по-батькові здобувача)

Керівник д-р геогр. наук, проф. Шакірзанова Ж.Р.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент д-р геогр. наук, проф. Берлінський М.А.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рекомендовано до захисту:

Протокол засідання кафедри

гідрології суші

№ 6 від 26 . 11 . 2024 р.

Завідувач(ка) кафедри

ОВЧАРУК Валерія

(підпис)

(прізвище,ім'я)

Захищено на засіданні ЕК № 5  
протокол №     від 12 . 12 . 2024\_ р.

Оцінка     /     /      
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Голова ЕК №5

(підпис)

ГРИБ Олег

(прізвище, ім'я)

Одеса 2024

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра гр. МГ-23 Дигаса О.В. за темою: «Розрахунок трансформації паводків на р.Дністер від м. Могильов-Подільський до с.Грушка».

**Актуальність теми.** Проходження дощових паводків на річках в сучасних умовах зміни клімату іноді носять катастрофічний характер, супроводжуються підйомами рівнів води, виходом її через відмітки заплави, і, як слідчий, затопленням прилеглих територій. Підвищене зливе навантаження на схилах Карпатських гір викликає численні паводки, і становить характерну особливість паводкового режиму всього Дністра, що викликає необхідність якісних прогнозів витрат води в періоди паводків.

**Мета і задачі дослідження.** Розрахунок трансформації паводкових хвиль і прогноз гідрографа паводка у нижньому створі річки Дністер - с.Грушка з врахуванням бічного припливу на її ділянці, виконання статистичної оцінки прогнозу витрат води у період проходження паводку.

**Об'єкт і предмет дослідження** – трансформація паводкових хвиль і прогноз гідрографа паводка на ділянці р.Дністер від м. Могильов-Подільський до с.Грушка.

**Методи дослідження.** Метод Калініна-Мілюкова для визначення ординат функції трансформації, метод інтегралу Дюамеля для розрахунку трансформації паводкових хвиль і прогнозу витрат води паводку, статистичні методи оцінки прогнозу методиками.

**Результати, їх новизна, теоретичне та практичне значення:** Розроблена та доведена до практичного використання методика розрахунку трансформації паводкових хвиль і прогноз гідрографа дощового паводка на ділянці р.Дністер від м.Могильов-Подільський до с.Грушка з врахуванням бічного припливу води під час проходження паводку, виконана оцінка методиками.

**Рекомендації щодо використання результатів роботи з зазначенням галузі застосування:** Результати роботи можуть використовуватися в оперативній роботі регіонального Івано-Франківського центру з гідрометеорології (ЦГМ) при прогнозуванні дощових паводків на р. Дністер.

### **Структура і обсяг роботи:**

Кількість сторінок – 69

Кількість рисунків – 12

Кількість таблиць – 17

Кількість літературних джерел – 24

**Ключові слова:** дощові паводки, трансформація, прогноз гідрографа, річка Дністер.

## ABSTRACT

Master's qualification work of the student gr. MG-23 Dyhas Oleksandr on the topic: "Calculation of the floods transformation on the Dniester River from the water gauging station (WGS) Mogilev-Podilskyi to Grushka".

**Relevance of the topic.** Rainfall floods on rivers in modern conditions of climate change are sometimes catastrophic, accompanied by rising water levels, its release through the floodplain, and, as a result, flooding of adjacent territories. The increased storm load on the slopes of the Carpathian Mountains causes numerous floods and is a characteristic feature of the flood regime of the entire Dniester, which necessitates high-quality forecasts of discharge of water during floods.

**The purpose and objectives of the study.** Calculation of the flood wave transformation and forecast of the flood hydrograph in the lower Dniester River - WGS Grushka, taking into account the lateral inflow to its section, and assessment of the forecast of water discharge during the flood period.

**Object and subject of the study.** Calculation of the flood wave transformation and forecast of the flood hydrograph on the Dniester River section from the water gauging station (WGS) Mogilev-Podilskyi to Grushka.

**Research methods.** The Kalinin-Milyukov method for determining the ordinates of the transformation function, the Duhamel integral method for calculating the transformation of flood waves and forecasting flood water discharge, statistical methods for evaluating the forecasting methodology.

**Results, their novelty, theoretical and practical significance.** The methodology for calculating the transformation of flood waves and forecasting the hydrograph of a rainfall flood on the Dniester River section from from the WGS Mogilev-Podilskyi to Grushka was developed and brought to practical use, taking into account the lateral inflow of water during the flood, and the methodology was evaluated.

**Recommendations for the use of the results of the work with an indication of the field of application.** The results of the study can be used in the operational work of the Ivano-Frankivsk Regional Center for Hydrometeorology (RCH) in forecasting rainfall floods on the Dniester River.

### **Structure and scope of the work:**

Number of pages - 69

Number of figures - 12

Number of tables - 17

Number of references - 24

**Keywords:** rainfall floods, transformation, hydrograph forecast, Dniester River.

## ЗМІСТ

	С.
Вступ .....	6
1 Природні умови формування паводків в басейні річки Дністер.	8
1.1 Географічне розташування річки і форми рельєфу.....	8
1.2 Основні види ґрунтового і рослинного покриву басейну..	11
1.3 Кліматичні умови формування дощових паводків на річках.....	18
1.4 Підземні води.....	22
1.5 Водний режим річки при формуванні паводків.....	24
1.6 Гідрографія р. Дністер та вивченість басейну.....	27
2 Методи розрахунку трансформації витрат води в русловій мережі та прогноз гідрографів паводків за лінійними моделями трансформації.....	28
2.1 Загальні положення теорії руху витрат води.....	28
2.2 Гідродинамічні методи розрахунку трансформації.....	29
2.3 Гідрологічні методи розрахунку трансформації.....	32
3 Прогноз гідрографів на підставі лінійних моделей трансформації.....	33
3.1 Теоретична основа прогнозу гідрографів паводків.....	33
3.2 Метод розрахунку трансформації паводка Маскінгам.....	34
3.3 Метод розрахунку трансформації паводка Калініна-Мілюкова.....	34

3.4	Розрахунок трансформації паводка за інтегралом Дюамеля.....	39
4	Розрахунок трансформації паводків на р. Дністер від м.Могильов-Подільський до с. Грушка.....	44
4.1	Вихідні дані до розрахунку трансформації паводку.....	44
4.2	Визначення ординат трансформаційної функції.....	44
4.3	Розрахунок гідрографа дощового паводку р.Дністер у с.Грушки за інтегралом Дюамеля.....	47
4.4	Оцінка розрахунків і прогнозу трансформації паводкової хвилі замикаючого створу р. Дністер - с.Грушка.....	48
	Висновки .....	55
	Перелік посилань.....	57
	Додатки .....	60

## ВСТУП

Проходження дощових паводків на річках, що в сучасних умовах зміни клімату іноді носять катастрофічний характер, супроводжується підйомами рівнів води, виходом її через відмітки заплави, і, як слідчий, затопленням прилеглих територій, де розташовані виробничі об'єкти та населені пункти.

Підвищене зливе навантаження на північно-східних схилах Карпатських гір обумовлює надмірне зволоження ґрунту, що викликає численні паводки, і становить характерну особливість паводкового режиму Дністра в цілому. Практична актуальність екологічних проблем, пов'язаних зі взаємодією суспільства з довкіллям, зі зміною клімату, з випадками природних катастроф, що почастишали, нині диктують необхідність якісних прогнозів і обґрунтованості рішень, що приймаються, на усіх рівнях управління.

*Метою* даної роботи є розрахунок трансформації паводкових хвиль і прогноз гідрографа паводка у нижньому створі річки Дністер - с. Грушка з врахуванням бічного припливу на її ділянці, виконання статистичної оцінки прогнозу витрат води у період проходження паводку.

*Об'єкт дослідження.* Рух витрат води в період проходження дощових паводків на р.Дністер від м. Могильов-Подільський до с.Грушка.

*Предмет дослідження.* Розрахунок трансформації паводкових хвиль і прогноз гідрографа паводка на ділянці р.Дністер.

*Вихідні дані.* Щоденні витрати води на р.Дністер в створах м. Могильов-Подільський та с.Грушка, що отримані з гідрологічних щорічників та з бази оперативних даних Українського Гідрометцентру ДСНС України, які сформовані в автоматизованому робочому місці гідролога (АРМ-гідро).

*Методи дослідження.* Використання методу Калініна-Мілюкова для визначення ординат функції трансформації, методу інтегралу Дюамеля для

розрахунку трансформації паводкових хвиль і прогнозу витрат води під час проходження паводку, статистичні методи оцінки прогнозованої методики.

*Результати дослідження.* Розроблена та доведена до практичного використання методика розрахунку трансформації паводкових хвиль і прогноз гідрографа дощового паводка на ділянці р.Дністер від м.Могильов-Подільський до с.Грушка з урахуванням бічного припливу води під час проходження паводку, виконана оцінка методики і розроблена схема випуску прогнозу щоденних рівнів води паводка на р. Дністер.

*Практичне використання.* Результати роботи можуть використовуватися в оперативній роботі регіонального Івано-Франківського центру з гідрометеорології (ЦГМ) при прогнозуванні дощових паводків на р.Дністер.

*Апробація результатів* – основні результати представлені на наукових студентських семінарах кафедри гідрології суші та на науковій конференції молодих вчених ОДЕКУ у 2024 р. Підготовлено тези доповіді з презентацією.

*Публікації.*

Дигас О.В. Особливості гідрологічних умов на річках території, що обслуговується ГМЦ ЧАМ, у 2020-2023 рр. *Матеріали XXIII Наукової конференції молодих вчених Одеського державного екологічного університету*, 22 - 26 квітня. Одеса : ОДЕКУ. 2024. С. 85-86.

<https://drive.google.com/file/d/1bXzXwlMEdvnVSriDpGePA-b7ESvMDbRN/view>

Тема роботи входить складовою частиною в наукову тематику кафедри гідрології суші за кафедральною темою «Гідрологічний і гідрохімічний режими річок України в сучасних умовах водокористування і зміни клімату», номер реєстрації № ДР 0123U101578 (термін виконання: 2023- 2027 рр.).

## **1 ПРИРОДНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ ПАВОДКІВ В БАСЕЙНІ РІЧКИ ДНІСТЕР**

## 1.1 Географічне розташування річки і форми рельєфу

Річка Дністер є найбільшою річкою Західної України і Молдови і разом з Дунаєм, Дніпром і Південним Бугом належить до великих річок водозбірного басейну Чорного моря (рис. 1.1) [1].

Басейн Дністра охоплює адміністративні області України (Львівську, Івано-франківську, Чернівецьку, Тернопільську, Хмельницьку, Вінницьку і Одеську). На території басейну у межах України розташовано 62 міста і 95 селищ міського типу [1,2].



Рис. 1.1 – Розташування басейну р. Дністер на території України і природний характер рельєфу

На Україні знаходяться верхів'я Дністра і його пригирлова частина загальною довжиною 628 км. Річка має виток на північному схилі Карпатських гір, з джерел, що виходять на північно-західному схилі гори Розлуч. Гирлом річки є її впадіння в Дністровський лиман Чорного моря у с.Вовче, в 35 км на південний захід від міста Одеси. Довжина річки 1352 км, площа водозбору 72100 км<sup>2</sup>. Відмітка витoku 760 м, гирла - 1,0 м, загальне падіння річки 759 м,

середній ухил водної поверхні 1,78 ‰, найбільший - 39,0 ‰, (на 4 км), найменший - 0,1 ‰ в нижній течії річки) [1,2].

За описом природних умов в літературних джерелах [1, 3-5] басейн р.Дністр має витягнуту форму довжиною майже 700 км, а середня ширина 120 км. Басейн річки розміщений на південно-західній частині Російської платформи (на західній частині Українського кристалічного щита, Волино-Подільської і Молдавської плитах) і Карпатських гірських споруд. Верхня ділянка басейну Дністер (від витoku до міста Галич) займає Західно-подільську піднесеність [3-5] (рис.1.2). Поверхня слабкохвиляста, розчленована глибоко врізаними річковими долинами (глибина долин в гирлових частинах досягає 150 м), часто з досить широким дном.



Рис. 1.2 - Долина Дністра в районі Галича (Івано-Франківська область)

Сучасний рельєф басейну характеризується наявністю структурних поверхонь, утворених неогеновими породами, і елювіально-делювіальним характером четвертинних відкладів. На вододільних просторах потужності їх не значні, а спостерігається збільшена потужність на схилах басейну. Західно-Подільська піднесеність з північного заходу на південний схід перетинається західною Толтровою грядою шириною 10-15 км, найбільш характерною

формою рельєфу, якою є окремі не правильної форми вершини, складені рифовими вапняками. Відносна висота Толтрових височин досягає 100 м, що при крутих, часто позбавлених рослинності схилах надає місцевості характер гірського ландшафту. На поверхні Толтрових височин четвертинні відкладення практично відсутні, між височинами делювіальні щебенисто-суглинисті відкладення мають потужність до 20 м [3, 4].

Уздовж північного краю Західно-Подільської піднесеності простягається Гологоро-Кременетська гряда, полого знижується в південному напрямі і що круто обривається в північному напрямі у вигляді уступу заввишки більше 150 м (до 220 м). Інтенсивна розчленованість призводить до утворення окремих ізольованих височин з плоскими вершинами. Біля підніжжя гряди виділяється ряд нижчих останців з куполоподібними вершинами, які позбавлені третинного покриву і складені з поверхні верхньокрейдяними породами. Четвертинні відкладення у багатьох місцях Гологоро-Кременетської гряди відсутній, в інших місцях вони представлені делювіальними і пролювіальними утвореннями [3, 4].

У південній частині Західно-Подільської піднесеності простягається широка тирасова рівнина лівобережжя Дністра складена з поверхні пісчано-галичними і суглинистими алювіальними утвореннями, піднята над дном долини Дністра більш ніж на 100 м і інтенсивно розчленована долинами лівих приток Дністра. Ця рівнина круто обривається до каніоноподібної долини Дністра [3, 4].

Максимальні відмітки поверхні в межах Західно-подільської піднесеності приурочені до Гологоро-Кременетського уступу і Толтрової гряді до західної частини, прилеглої до Опольської піднесеності. Із заходу до Західно-подільської височини прилягає Опілля - скульптурна піднесеність є найбільш піднесеною і найбільш розчленованою частиною рівнинної

території України. Піднесеність Опілля розчленована майже паралельними долинами лівих приток Дністра [3, 4].

На південь від Львова тягнеться Львівське плато-структурна рівнина на півночі і сході що круто обривається до Бузько-Стирської низовини, на півдні що примикають до Опілля. Львівське плато покрите воднольодовиковими, переважно суглинними відкладеннями. У північній частині Львівського плато різко виділяється останцеві височини, серед яких широкою популярністю користується гори Диявольська Скеля, Замкова та ін.

Карпатський район територіально пов'язаний з виходами чистих масивних вапняків, іноді брекчєподобних, складних, іноді глинистих, крем'янистих, піскуватих вапняків нижнього тріаса, верхньої юри, нижньої крейди, що складають північну і південну гряди зони круч. Карпатська частина зони входить до складу вузької дуги шириною від 1-2 до 20 км, що простягається від Мармарожського масиву до Віденського басейну [3, 4].

Утесові гряди не створюють безперервних поясів, вони складаються з великих блоків складених твердішими породами, що утворюють кручі. Наявність круто похилого залягання шарів і свит і близькою до вертикальної тектонічної тріщинуватості визначає заставляння і морфологію карстових порожнин і розподіл заповнювачів в них [3, 4].

## **1.2 Основні види ґрунтового і рослинного покриву басейну**

*Ґрунтовий покрив.* Дана територія відноситься до Західного лісостепу, до Лісолугової зони Передкарпаття і Лісолуговій зоні Карпат [1, 3, 4].

Ґрунти Західного Лісостепу можуть бути зведені до наступних: чорноземи типові, чорноземи опідзолені і темно - сірі опідзолені ґрунти, ясно - сірі опідзолені і дерново підзолисті ґрунти, чорноземи лугові, на різних ґрунтоутворюючих породах, чорноземи карбонатні на щільних

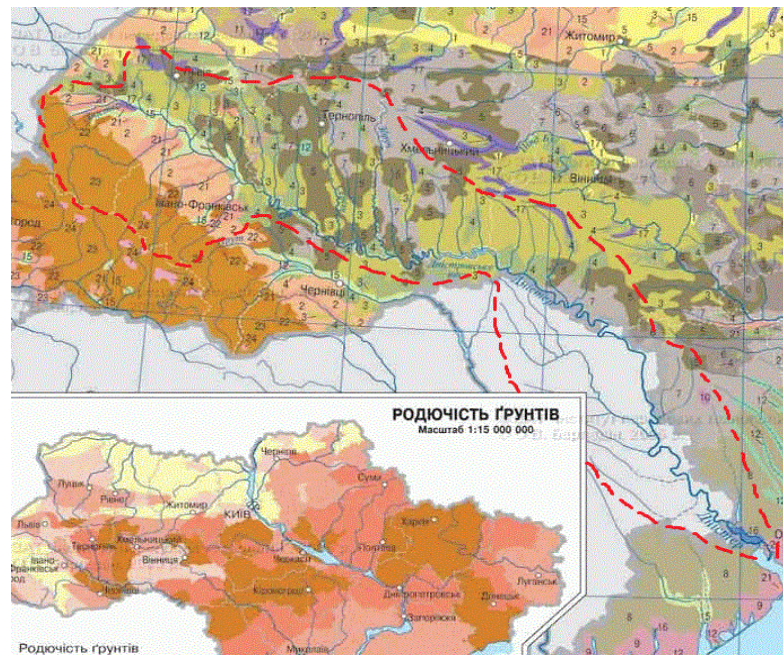
грунтоутворюючих породах, лугові ґрунти (рис.1.3). Профіль чорноземів типових складається з горизонтів: гумусового, перехідного, одного або двох, переритих землеріями, і ґрунтоутворюючі породи - карбонатного лісу.

Малопотужні (неглибокі) чорноземи мають один перехідною горизонт, і загальна глибина профілю складає близько 80 см Потужні(глибокі) чорноземи мають два перехідні горизонти, загальна глибина їх профілю складає 130 - 20 см.

Чорноземи опідзолені приурочені до широких плато і до довгих пологих схилів: схили з великою крутизною покриті темно-сірими опідзоленими ґрунтами. Профіль чорнозему опідзоленого складається з горизонтів гумусово-елювіального, гумусного, перехідного елювіального, іллювіального слабо вираженого або ж вилуженої ґрунтоутворюючої породи з різко вираженою лінією скипання.

Темно-сірий опідзолений ґрунт має профіль, чітко диференційований на горизонти: гумусово-елювіальний, гумусовий ілювіальний. Чорноземи опідзолені і темно-сірі опідзолені ґрунти мають особливо різко виражені ознаки опідзоленості, верхні шари особливо збагачені кремнекислотою і відрізняються світлішим кольором, незважаючи на більший зміст гумусу, чим в глибших шарах [3, 4].

Сірі опідзолені ґрунти поширені в місцях з сильно розчленованим рельєфом і залягають на крутіших середніх третинах схилів вище темно - сірих опідзолених ґрантів. Профіль їх складається з горизонтів: гумусово-елювіального, елювіального і вилуженою ґрунтоутворюючою менш іллювірованою породою, різко вираженою лінією скипання, що відділяється, від карбонатної породи. Сірі ґрунти містять залозистий марганцеві конкреції що є непрямим показником їх поверхневого. Проте сірі ґрунти і їх верхні горизонти дуже збагачені кремнекислотою [3, 4].



### Тип ґрунтів

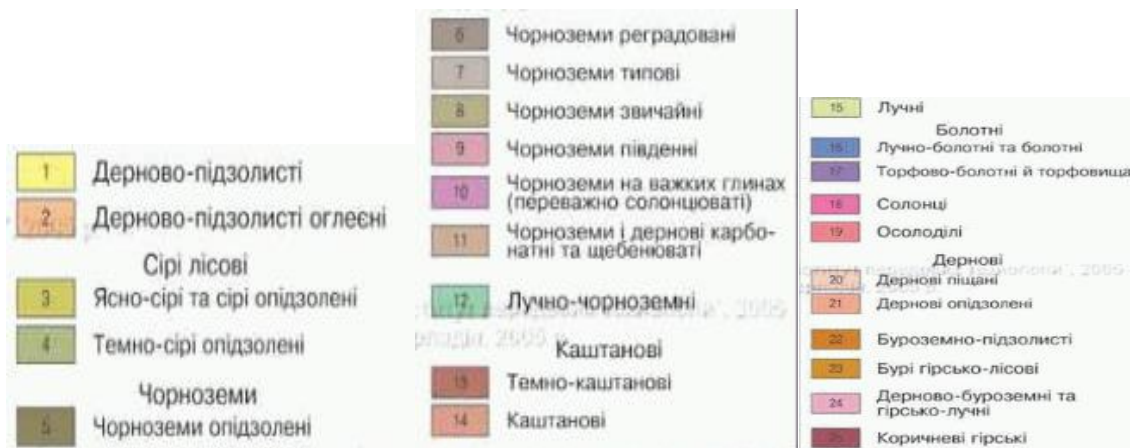


Рисунок 1.3 – Карта - схема ґрунтів в басейні р. Дністер [6]

Світло-сірі опідзолені ґрунти мають профіль, аналогічний профілю дерново-підзолистого ґрунту, відмінності полягають в тому, що елювіальний

горизонт світло-сірого опідзоленого ґрунту є збагаченим кремнекислотою ілювіальний горизонт, і агрегати, що входять до його складу, збагачені півтора окислами заліза і алюмінію усередині мають буре забарвлення, а у дерново-підзолистих ґрунтів цей горизонт складається майже суцільно з кремнекислоти [3, 4].

Чорноземи лугові залягають острівцями серед глеюватих чорноземів в широких пониженнях, в порівняно високим рівнем ґрунтових вод. Відрізняються слабо розвиненим (укороченим) переритим землеріями перехідним горизонтом, який до того ж буває небезпечним.

Лугові ґрунти поширені по дну балок, понижень, в заплавах річок. У балках і пониженнях лугові ґрунти, як правило, карбонатні внаслідок водного режиму. Карбонатні ґрунти поширені на рівнинах ерозійних денудацій Опілля. Ґрунти Лісолугової зони Передкарпаття і Карпат - бурі лісові, дерново-буроземні, бурі лісові опідзолені ґрунти.

Бурі лісові ґрунти утворилися під деревною рослинністю переважно на схилах різної крутизни, на добре дренованих щебенистих ґрунтоутворюючих породах різного механічного складу і походження, що є елювієм делювій корінних порід - осадових і магматичних [3, 4].

Бурі лісові опідзолені ґрунти поширені головним чином в низкогірній і середгірній підзонах на нижніх частинах схилів з менш вираженим промивним водним режимом [3, 4].

Дерново-буроземні ґрунти характеризуються присутністю верхнього темно-бурого гумусового горизонту до глибини 36 см і більше, і навіть перехідною горизонт буває забарвлений частково або повністю в темний колір [3, 4].

*Рослинний покрив.* Рослинність території басейну Дністра у межах України відрізняється різноманітністю (рис. 1.4). Лісистість в середньому

досягає 14%, тільки в Чернівецькій області - близько 30%. Найвищий відсоток розораності території басейну Дністра - у Вінницькій області [1, 3-5].

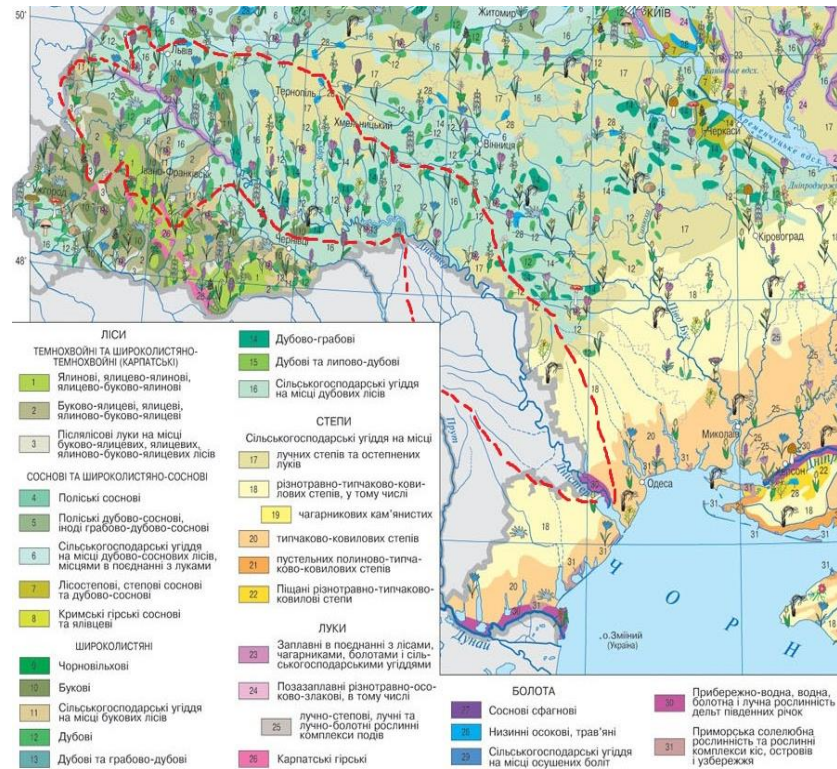


Рисунок 1.4 – Карта - схема рослинності в басейні р. Дністер [6]

В межах території України на частині басейну р Дністер лісовим покривом зайнято близько 1,2 млн. га. Сільськогосподарські землі подекуди зайняті полезахисними смугами на площі 23,4 тис. га й захисними насадженнями на площі 21,0 тис. га. У гірських частинах басейну, зокрема у верхній течії р. Дністер, відбувається надмірне вирубування лісів з розвитком пасовищного господарства. Упродовж останнього століття площа лісів зменшилася наполовину, також зросло й освоєння території, у вигляді розораності, що призвело до збільшення ерозії ґрунтів й ландшафтів, підвищилося забруднення ґрунтів і, як наслідок, стала гіршою якість поверхневих вод, що використовуються для питного водопостачання [5, 7].

Басейн річки Дністер відноситься до лісостепової зони, до широколистяної лісової зони і Карпатської під провінції [1, 3-5].

У лісостеповій зоні найбільш поширенішими є грабово-дубові ліси і букові ліси. Грабово-дубові ліси займають вододіли і пологіші, ніж діброви, схили зі світло-сірими ґрунтами. У травостої різних асоціацій переважають осока волосиста, зеленчук жовтий, маренка запашна, зірочник ланцетолистий і інші [3, 4]. Мальовничий знімок типів рослинності на території басейну Дністра представлений на рис.1.5.



Рис. 1.5 - Типи рослинності на території басейну Дністра

Деревостій букових лісів одноярусний із зімкнутою крон 0,9-1,0 і продуктивністю I- II бонітету. У травостої різних асоціацій переважає осока волосиста, маренка запашна. У широколистяній - лісовій зоні поширені

грабово-дубові ліси, букові або бузини, вільхові ліси, заплавні луги у поєднанні з лісами, кущами і сільськогосподарськими угіддями [3, 4].

Деревостій корінних насаджень грабово-дубових лісів двох'ярусний із зімкнутою крон 0,9-1,0. Перший ярус утворений дубом з домішкою клена псевдоплатанового, дуба скельного. Другий ярус утворений дубом звичайним. Ярус підліска розвинений слабо, або зовсім відсутній. Букові ліси зустрічаються невеликими масивами в межах усіх округів. Ярус підліска у непорушених насаджень відсутній. У нім зустрічаються тільки окремі екземпляри вовчого лика, ліщини звичайної, жимолості лісової. Деревостій вільхових лісів одноярусний із зімкнутістю крон 0,7 – 0,9 [3, 4].

Найбільш поширеними серед лугів є справжні, болотисті і торф'яністі луги. Справжні луги представлені формаціями лисохвосту лугового, вівсяниці лугової і запашного колоска. Торф'яністі луги складаються з формацій щучнику дернистого і бухарника тернистого. Найбільш поширеними серед болотяних лугів є формації двукісточника тростниковидного, осоки стрункої і манника водяного [3, 4].

У Карпатській підпровінції зустрічаються, букові, ялицеві, дубові ліси у поєднанні з сільськогосподарськими угіддями і заплавними лугами у поєднанні з лісами, кущам і сільськогосподарськими угіддями [3]. Деревостій ялинових лісів(ялинники) одноярусний, із зімкнутою крон 0,9-1,0 рідко 0,6-0,7 і продуктивністю від I до IV бонітету. Деревостій букових лісів одноярусний із зімкнутою крон 0,8-1,0 і продуктивністю I - II бонітету. Деревостій дубових лісів одноярусних із зімкнутою крон 0,7-0,9 і продуктивністю I - II бонітету [4, 5].

### **1.3 Кліматичні умови формування дощових паводків на річках**

Досить велика довжина річки, яка бере початок в Карпатах і впадає в Дністровський лиман Чорного моря, обумовлює її відмінності в кліматичних характеристиках басейну [8, 9].

У формуванні клімату верхнього і середнього ділянок басейну річки велику роль грають Карпати і Волинська піднесеність. Вони впливають на загальну циркуляцію атмосфери, обумовлюють фронтогенез в горах і трансформацію повітряних мас над просторами рівнини [3, 8].

У гірській частині басейну відзначається понижений фон температури повітря, висока вологість.

Південні райони басейну належать Чорноморській кліматичній підобласті, яка є частиною атлантико-континентальної степової кліматичної області. Зима тут зазвичай м'яка, нестійка, характеризується зміною морозних періодів відлигою [3, 8].

Для весняного періоду характерна поступова трансформація повітряних мас помірних широт в тропічні. У травні настає безхмарна і жарка погода [3, 8].

Нижче проаналізовано основні метеорологічні характеристики в межах лівобережжя Дністра (за даними метеостанції Могилів - Подільський), які подані у вигляді таблиць як кліматична норма (з 1961 – 1990 рр.), що залучені з кліматичного кадастру України [9]. Ця станція розташована на лівобережжі р. Дністер і характеризує розглядувану ділянку річки.

*Температура повітря.* Середньобогаторічна річна температура повітря по санції м.Могилев-Подільський становить 8,9 °С (табл.1.1). Найбільш холодними місяцями для даної території являється січень, лютий, коли температура повітря коливається від -2,0 до -4,1 °С. Найбільш теплими місяцями - червень, липень, серпень. Температура коливається від 18,8 до 20,0 °С [9].

Дата переходу середньо добової температури повітря через  $-5^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$  C представлена в табл. 1.2.

Таблиця 1.1 - Середньомісячна і річна температура повітря [9]

Станція	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
м.Могилев-Подільський	-4,1	-2,0	2,3	9,9	15,7	18,8	20,0	19,3	15,0	9,0	3,7	-0,9	8,9

Таблиця 1.2 - Дата переходу середньо добової температури повітря через  $-5^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$

Станція	Весна			Осінь		
	$-5^{\circ}$	$0^{\circ}$	$5^{\circ}$	$-5^{\circ}$	$0^{\circ}$	$5^{\circ}$
м.Могилев-Подільський	-----	6/111	29/111	6/X1	3/X11	-----

*Опади.* Одним з самих важливих елементів формування гідрологічного режиму річок, особливо при проходженні дощових паводків, відіграють атмосферні опади. Середньо багаторічна річна кількість опадів для метеостанції Могилів-Подільський становить 611 мм (табл.1.3) [9]. Середньомісячна кількість опадів для холодного періоду (з листопада по березень) є рівною 176 мм, а для теплого періоду (з квітня по жовтень) – 435мм [9].

Так, як в роботі розглядається формування дощових паводків, то в табл. 1.4 представлено кількість днів з опадами різної величини. З найбільшою кількістю опадів 5 мм и більше в теплий період становить 3,6-4,2 дні, а 10 мм і більше - 1,7-2,4 дні [9].

Таблиця 1.3 - Середня місячна і річна кількість опадів (мм) з поправками на змочування [9]

Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Холодний період (XI-III)	Теплий період (IV-X)	Рік
<b>Могилів-Подільський</b>															
Середня	35	33	31	46	71	92	95	55	45	31	38	39	176	435	611

Таблиця 1.4 - Кількість днів з опадами різної величини

Станція	Опали, мм	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
		Могилів-Подільський	>0.1	13,6	12,5	10,3	10,7	11,3	11,8	10,9	10,9	8,6	8,6	12,5
	>1	5,6	5,6	4,7	6,9	7,6	8,2	8,1	7,6	5,2	5,0	5,6	6,2	76,3
	>5	1,3	1,4	1,4	2,3	3,2	3,6	4,2	4,1	2,2	2,4	2,2	1,8	30,1
	>10	0,3	0,6	0,3	0,8	1,4	1,7	1,9	2,4	0,9	1,1	1,0	0,5	12,9
	>20	0,04	0,04	0,0	0,2	0,6	0,7	0,6	0,9	0,4	0,3	0,2	0,2	4,1
	>30	0,0	0,0	0,0	0,04	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0	1,7

*Вітер.* Загальна циркуляція атмосфери і особливості рельєфу визначають умови вітрового режиму розглядуваної території. Напрямок вітру відображає циркуляцію на північній і східній периферії відрогів високого

тиску. На рівнинній території ділянки впродовж року найчастіше повторюється вітер північного і північно-західного напрямів. Впродовж теплого півріччя нерідкі суховії - сильні вітри при низькій відносній вологості [3, 8].

Середня за рік швидкість вітру метеостанції Могилев-Подільський становить 2,5 м/с (табл. 1.5), а протягом року по місяцях вона розподіляється досить рівномірно [9].

Таблиця 1.5 - Середня місячна і річна швидкість вітру, м/с

Станція	Висота флюгера	I	II	III	IV	V	VI	VI I	VII I	IX	X	XI	XI I	Рік
Могилев-Подільський	14	2,5	3,0	3,2	3,0	2,8	2,4	2,1	2,0	2,0	2,2	2,6	2,4	2,5

*Вологість повітря.* Її розподіл по території залежить від температурних і циркуляційних особливостей описуваної території. Вологість повітря істотно змінюється з півночі на південь і із заходу на схід. Кількість водяної пари в повітрі змінюється по сезонах року і по території [3, 8].

Для метеостанції Могилев-Подільський середня річна відносна вологість повітря (%) становить 59%. Мінімальних значень вона має протягом березня-вересня й становить 44-49%. Починаючи з листопада й по лютий відносна вологість стає найбільшою - 73-78% (табл. 1.6).

Таблиця 1.6 - Середня місячна і річна відносна вологість повітря (%)

Станція	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
Могилев-Подільський	75	73	63	47	44	47	46	48	49	59	74	78	59

*Вологість ґрунту.* Запаси ґрунтової вологи формуються в результаті сукупної тривалої взаємодії клімату ґрунту і рослинного покриву. Значною мірою на режим зволоження впливає рельєф місцевості і глибина залягання ґрунтових вод. Середньорічний максимум спостерігається в другій декаді квітня. Середньорічний мінімум відзначається у кінці вегетаційного періоду і є досить значною величиною [3].

#### **1.4 Підземні води**

Басейни річки Дністер відноситься до п'ятого гідрогеологічного району, який охоплює Карпатську піднесеність [1-5]. Сюди віднесений північно-західний схил Українського кристалічного щита. У справжньому районі дренуються води верхньокрейдяних відкладень (мергельно-крейдяної товщі і сеномана), бучаксько - канівською, полтавських шарів неоген. Річка Дністер в основному відноситься до водоносності серії і має поширення у вигляді окремих плям, вцілілих від розмиву на піднесених ділянках плато.

Водомісткими є піски тонко - і дрібнозернисті, рідше середньо і різнозернисті. В межах Українського кристалічного щита іноді волинські піски лежать безпосередньо на первинних каолінах або на кристалічних породах. У покрівлі Волинських відкладень у більшості випадків залягають строкаті, рідше бурі і червоно-бурі глини, місцями безпосередньо суглинки. Там, де водоносні піски полтавської серії залягають на харківських водоносних пісках, вони утворюють єдиний водоносний горизонт. Глибини

залягання вод коливається від 2,5 до 53,5 м; у Волино - Подільській западині рівень зустрічається на глибині 18-83 м, частіше 40-50 м. Потужність водоносного горизонту змінюється від 0,3 до 29,5 м, переважає 10-15 м. Дебіти свердловин змінюються від 0,001 до 0,7 л/сек [3].

Живлення відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів і вод вище розміщених горизонтів, а також за рахунок підживлення водами харківських відкладень або водами тріщин кристалічних порід за відсутності водоупору, що розділяє їх. Спостерігаються різкі сезонні коливання рівня. Мінералізація вод невисока - 0,44-0,7 г/л.

За типом води гідрокарбонатно-кальцієві в межах западини 33,0 м. У зв'язку з наявністю в покрівлі водоносних шарів води горизонту мають натиск, але у зв'язку зі значним дренаванням ерозійною мережею на більшій частині поширення вони безнапірні. Висота натиску досягає 25,5 м, переважаючи до 6,0 м. Рівні води залежно від рельєфу місцевості коливаються від 3,0 до 54,0 м, рідше досягають 60-70 м (у Волино-Подільській) [3].

Зниження рівня спрямоване від вододілів до долин річок і балок, що дренають горизонт. Дебіти свердловин змінюються від 0,001 до 0,7 л/сек. Живлення відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів і вод вище розміщених горизонтів, а також за рахунок підживлення водами харківських відкладень або водами тріщин кристалічних порід за відсутності водоупору, що розділяє їх. Спостерігаються різкі сезонні коливання рівня. Мінералізація вод невисока - 0,44-0,7 г/л. За типом води гідрокарбонатно-кальцієві [3, 4, 5].

## **1.5 Водний режим річки при формуванні паводків**

Водний режим визначається фізико-географічними чинниками підстильної поверхні території (гідрогеологією, орографією, гідрографією,

особливостями клімату) та морфометричними характеристиками русла і заплави річки [3, 10]. За умовами живлення басейн Дністра відповідно до його орографічних і кліматичних особливостей поділяють [1,3,4,10] на три частини: Карпатську, Волино - Подільську і нижню або південну.

Розглядувана ділянка річки Дністер розташована в Волино - Подільській частині басейну - це лівобережна частина водозбору від впадання р. Верещиця до с. Кам'янки, є поверхнею з добре розвиненою гідрографічною мережею (горби, піднесення тощо). Дощові опади відрізняються не значною частотою і тривалістю, і вони тому менш впливають на режим стоку річок ніж у верхній гірській частині. Ґрунти тут більше водопроникні, ніж в Карпатській частині басейну, вологість повітря менше і умови для випаровування більш сприятливіші. Отже, у Волино - Подільській частині басейну умови для поверхневого стоку загалом гірші, ніж в Карпатській, але не виключено формування паводків, іноді катастрофічного характеру [11].

Так, в живленні Дністра велику роль відіграють карпатські притоки. З басейну верхнього Дністра до с. Заліщики, що займає лише 30% площі водозбору, стікає в середньому 70% усього стоку, інші 30% води стікає з 70% площі середньої і нижньої течії річки [3-5].

У зв'язку з умовами живлення режиму стоку на окремих ділянках р.Дністра відрізняється [3,4].

Для верхньої частини характерною є велика кількість паводків впродовж усього року внаслідок випадання короточасних інтенсивних опадів в теплий період року, короточасного танення снігу в горах в період зимової відлиги і загального танення снігового покриву у весняний період, виділити який достатньо складно з серії піків, які проходять протягом січня-квітня. В гірській частині річки мають зубчасті пилкоподібні гідрографи.

Для річок середньої і нижньої течії характерною є наявність переважно одної основної хвилі - весняного водопілля від танення снігу. Дощові паводки

виникають від опадів теплого періоду, але вони не такі інтенсивні, як паводки карпатських річок. На нижній частині басейну немає суттєвого припливу поверхневих вод і режим стоку є більш спокійний.

Таким чином, можемо бачити, що головною областю формування стоку є верхня гірська частина басейну, що має паводковий режим впродовж усього року. Оскільки стік верхнього Дністра складає більший відсоток припливу (70% стоку усієї річки), то паводковий режим зберігається на всьому протязі річки від верхів'я до гирла [3,10].

Щороку на річці спостерігається до п'яти паводків. Рівні води при цьому можуть зростати на 3-4 м, а іноді і більше. Для Дністра максимальні витрати дощових паводків значно більші, ніж весняного водопілля. Найбільша амплітуда коливань рівня води (9-10 м) спостерігається в середній течії, зокрема, зблизька в/п Заліщики. Що стосується розташованої нижче ділянки, де амплітуда також була дуже великою, то нині вона перетворена на Дністровське водосховище [3,10, 11]. Суміщений графік коливань рівнів води р.Дністер біля м.Галич та м.Могильов-Подільський представлений на рис.1.6. [12].

Так, на території Одеської області у червні-липні 2020 р. в наслідок великої кількості опадів у верхній частині Дністра та попуску паводкової хвилі в кінці червня на початку липня спостерігався паводок на Нижньому Дністрі біля с.Маяки. Підйом рівнів розпочався 26 липня и поступово підвищувались на 4-7 см за добу та вже 3 червня спостерігався максимум 167 см, загальний підйом склав 47 см [11].

I	II	III	IV	V	VI	VII	VII	IX	X	XI	XII
---	----	-----	----	---	----	-----	-----	----	---	----	-----

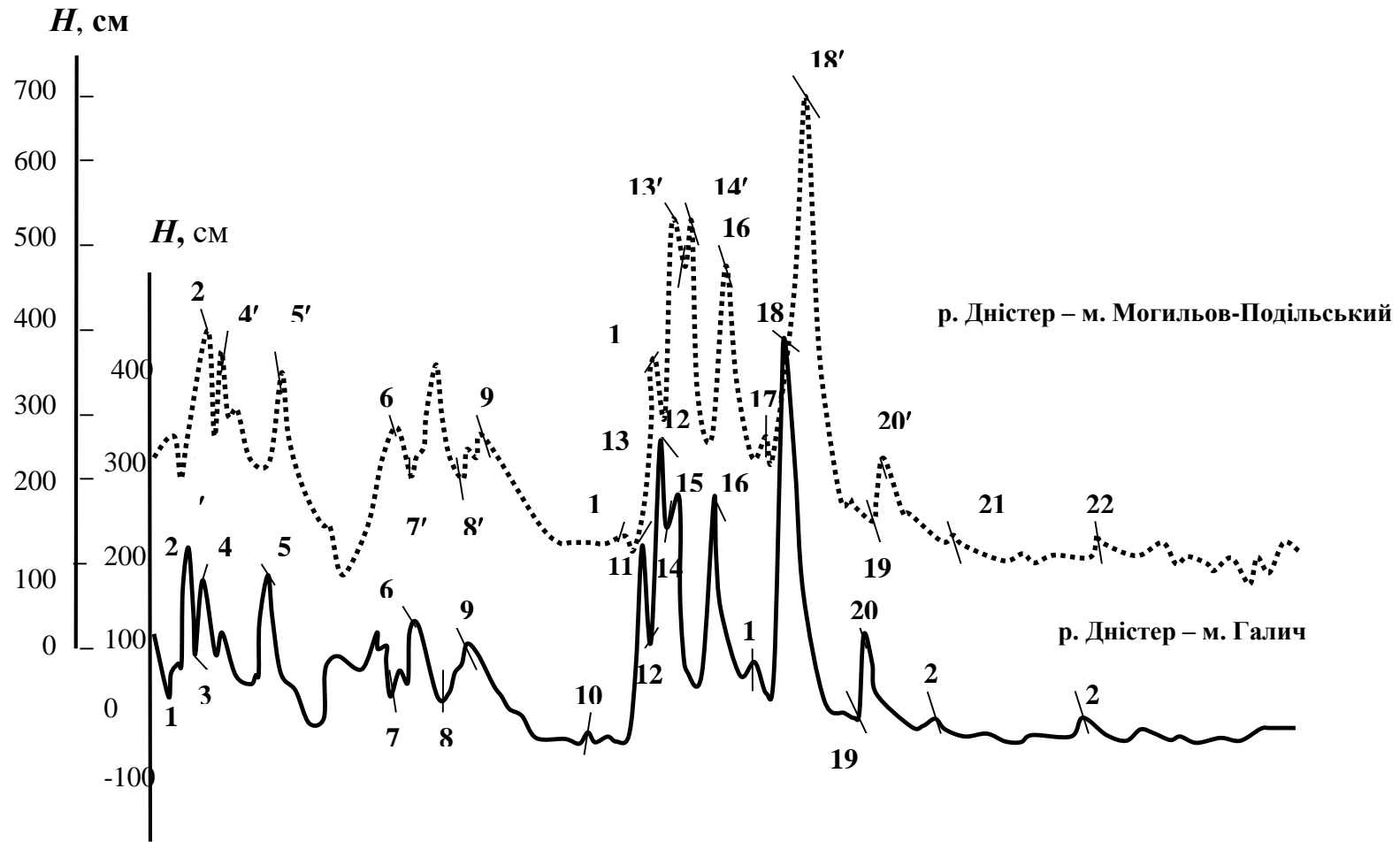


Рис. 1.6 – Суміщений графік коливань рівнів води р.Дністер біля м.Галич та м.Могильов-Подільський [12]

## 1.6 Гідрографія р. Дністер та вивченість басейну

Річкова мережа верхів'я Дністра має виражену асиметричність: більшість її припливів течуть від Карпат. При інтенсивних дощах або сніготаненні ці припливи можуть швидко змінювати свій рівень і рівень води в Дністрі. Враховуючи, що падіння русла Дністра складає тут близько 0,5 м/км, а припливів в 2-3 рази більше, можна зробити висновок про закономірне уповільнення течії припливів з підходом до Дністра і освіту ними гідрологічного підпору водам верхів'я Дністра. Така схема створення підпорів особливо сприятлива для затоплень долин, якщо підйом рівнів в річках здійснюватиметься скрізь одночасно або ж починаючи від нижчих за місцем впадання припливів (від Свичи, Стрия) [3, 5].

Дністер відноситься до числа тих річок, стік яких вивчений досить добре. Регулярні спостереження за рівнем річки почалися ще в 1850 р. [13].

На розглянутій території лівобережжя басейну р. Дністер налічується 43 діючих гідрологічних поста, з них 33 поста знаходяться на лівобережних притоках Дністра [13]. Розрахунок трансформації паводків и короткострокового прогнозу витрат води під час паводку на р. Дністер здійснюється на ділянці річки від м.Могильов-Подільський до с. Грушка. По стоковому посту 81052 м.Могильов-Подільський ( $F=43000 \text{ км}^2$ ) спостереження за витратами води почалися згідно даних [13] від 13.01.1877 (01.01.1983) й відбуваються по теперішній час. Перша дата відповідає першому відкриттю поста, друга, у дужках, останній даті переносу водомірного пристрою [13]. Належність поста є до ГМС України. Цей пост є верхнім (вхідним) створом ділянки р. Дністер для розрахунку трансформації паводкової хвилі. Пост с. Грушка ( $F=48700 \text{ км}^2$ ) розташований нижче за течією (належність поста до Молдавський Гідромет) і є замикаючим створом ділянки р. Дністер для розрахунку трансформації паводкової хвилі и прогнозу витрат води під час дощових паводків.

## 2 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ТРАНСФОРМАЦІЇ ВИТРАТ ВОДИ В РУСЛОВІЙ МЕРЕЖІ ТА ПРОГНОЗ ГІДРОГРАФІВ ПАВОДКІВ ЗА ЛІНІЙНИМИ МОДЕЛЯМИ ТРАНСФОРМАЦІЇ

### 2.1 Загальні положення теорії руху витрат води

Рух води з верхів'їв річки вниз за течією відбувається у вигляді хвилі, конфігурація якої в різних створах може бути обчислена методом, відомим під назвою «трансформація паводкової хвилі». Регулююча ємність русла та інші фактори викликають розпластування хвилі. Змінний характер русла і надходження води з приток ускладнюють проблему [14-16].

Розрахунок трансформації паводкових хвиль при їх русі по руслах і водосховищах проводиться різними методами, що ґрунтуються на вирішенні рівнянь нерозривності та енергії (рівняння Сен-Венана):

- рівняння балансу (нерозривності) у випадку, якщо на ділянці є бічний приплив  $q$

$$\Delta W = -\frac{\partial Q}{\partial \ell} d\ell dt + q d\ell dt ; \quad (2.1)$$

- рівняння руху (енергії) води на ділянці річки

$$g \left( i - \frac{dh}{d\ell} \right) = \frac{gV^2}{C^2 R} + \frac{dV}{dt} + V \frac{\partial V}{\partial \ell} . \quad (2.2)$$

де  $\Delta W$  - зміна об'єму води ( $\text{м}^3$ ) на ділянці за час  $\Delta t$  ;

$Q$  - витрата води,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$t$  - координата часу;

$\ell$  - координата відстані, яка визначається вздовж потоку (довжина ділянки річки);

$q$  - боковий приток на ділянці річки;

$g$  - прискорення сили тяжіння;

$I$  - ухил поверхні потоку;

$i$  – ухил при сталому русі потоку;

$\frac{dh}{d\ell}$  - додатковий ухил при проходженні паводку ( де  $h$  - глибина потоку);

$V$  - швидкість в перерізі;

$R$  - гідравлічний радіус;

$C$  - коефіцієнт Шезі.

Прогноз ходу паводка може бути здійснений на підставі числового інтегрування системи рівнянь нерозривності (2.1) і рівняння руху (2.2).

Ці рівняння є основою всіх методів розрахунку трансформації паводкової хвилі при її русі руслом і через водосховище [14]. Для розрахунку трансформації паводкової хвилі в руслах річок існують дві основні групи методів - гідродинамічні методи та гідрологічні методи. Для розрахунку зниження паводку водосховищем існують більш спрощені моделі [14].

## 2.2 Гідродинамічні методи розрахунку трансформації

*Повний метод.* За допомогою методу повного динамічного розрахунку трансформації, який враховує ефект нарощування швидкості течії та ухил водної поверхні, можна надійно визначити витрати води та рівні водної поверхні для наступних випадків неусталеного руху води [14]:

а) рух хвиль вгору за течією під впливом таких впливів, як припливи або штормові нагони з моря;

- b) явище підпору води за рахунок розташованого нижче водосховища або впадання припливу;
- c) типові паводкові хвилі на рівнинних річках з незначним ухилом дна, менше 0,05%;
- d) перервні хвилі, що викликаються скиданням води з водосховища в процесі його експлуатації або виникають при катастрофічному прориві греблі.

Динамічний розрахунок заснований, як правило, на вирішенні одновимірних гідродинамічних рівнянь неусталеного руху, відомих як рівняння Сен-Венана. Ці рівняння, наведені вище, зазвичай виражені у своїй консервативній формі та використовуються у вигляді [14] рівняння нерозривності (34.3) та рівняння енергії (34.4) в [14]. Ці рівняння містять такі змінні як витрата води; площа живого перерізу; площа поперечного перерізу річки чи водосховища при мертвому обсязі; рівень водної поверхні; швидкість потоку у напрямку координати  $x$ ; ширина потоку у живому перерізі; коефіцієнт шорсткості Маннінга; гідравлічний радіус; ефект вітру; коефіцієнт вітру; швидкість вітру; кут, утворений напрямом вітру та віссю річки та інші.

Чисельні методи вирішення часних диференціальних рівнянь, рівнянь (34.3) та (34.4) в [14] для річок з непорушеним режимом, можна поділити на дві основні категорії методів: явні та неявні. Найвідомішим явним методом є метод характеристик. У наші дні, однак, він широко не застосовується. Існують також явні та неявні методи кінцевих різниць. Різним методам притаманні свої переваги та недоліки.

Необхідно враховувати також такі фактори, як стійкість рішень та збіжність, необхідний час для розрахунків та обсяг пам'яті ЕОМ, ступінь складності програмування та математичного забезпечення. Деякі методи перед їх використанням вимагають модифікації рівнянь (34.3) та (34.4) в [14].

У цілому нині, неявні методи кінцевих різниць [17] є складнішими, а й ефективнішими проти явними методами під час розрахунку руху води, що не встановилася, для періоду в кілька діб. Явні методи можна використовувати

для тривалих інтервалів часу. Явні методи прості, проте пов'язані з проблемами стійкості рішень, якщо не зовсім правильно вибрано часовий інтервал. Ці та інші можливі обмеження слід ретельно зважити перш, ніж вибрати певний підхід для вирішення прогностичних завдань розрахунку трансформації або при виборі існуючого динамічного методу для конкретного випадку [14].

Правильна оцінка граничних та початкових умов при вирішенні рівнянь Сен-Венана в оперативному режимі є, ймовірно, самим важливим завданням при застосуванні динамічного методу розрахунку трансформації.

Іншим важливим завданням є створення ефективної системи збору та обробки даних, що використовуються у розрахунках [14].

*Дифузія та кінематичний розрахунок.* Якщо трохи змінити рівняння кількості руху та знехтувати впливом вітру і кількістю руху за рахунок бічних приток, можна отримати дуже ясну картину, яка показує основні відмінності між динамічним, дифузійним та кінематичним розрахунком трансформації.

Поділимо всі складові рівняння (2.2) на прискорення  $g$ . Таким чином, рівняння Буссінеська матиме вигляд у редакції [16]

$$i - \frac{dh}{d\ell} = \frac{V^2}{C^2 R} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial \ell} . \quad (2.3)$$

Рівняння включає до себе - кінематичну модель, дифузійну модель, динамічну модель.

При першому рівні наближення членами рівняння, що представляють прискорення, що стосується тимчасових змін припливу та просторового зміни швидкості, нехтують. Отримана в результаті модель розглядається як дифузійна модель. У деяких випадках можна нехтувати також членом, що

характеризує силу тиску та розглядати рівняння кількості руху як баланс між силами тяжкості та тертя. Така апроксимація відома як кінематична модель.

У роботі [18] показано, що апроксимація в кінцевих різницях моделі кінематичної хвилі збігаються з методом Маскінгам [14,15,16].

### 2.3 Гідрологічні методи розрахунку трансформації

Крім методів, що використовують обидва рівняння Сен-Венана, існують кілька методів, в яких використовується тільки рівняння нерозривності. При цьому досліджується тільки хвиля розповсюдження шляхом розгляду збільшення та зменшення обсягу води на ділянці, розташованій між двома пунктами вимірювань. Гідрологічна модель простіша, з її допомогою легше враховувати додаткове надходження води від різних джерел. Однак через те, що при використанні цих методів зв'язок між об'ємом води та стоком встановлюється емпірично, їх не можна використовувати в тих випадках, коли дані про стік і рівнях води необхідні для цілей проектування [14].

При використанні гідрологічних методів визначається стік у верхньому створі та трансформація використовується для розрахунку стоку та рівня води в нижньому створі. Ця трансформація полягає у вирішенні рівняння за допомогою *використання зв'язку між об'ємом води та стоком води*.

Найпростіші методи розрахунку трансформації паводкової хвилі засновані на припущення про лінійну залежність між об'ємом води і стоком, що дозволяє отримати аналітичні рішення.

## 3 ПРОГНОЗ ГІДРОГРАФІВ НА ПІДСТАВІ ЛІНІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСФОРМАЦІЇ

### 3.1 Теоретична основа прогнозу гідрографів паводків

Розрахункові співвідношення для прогнозів витрат і рівнів води дощових паводків засновані на рішенні рівнянь нерозривності, яке проінтегроване по довжині річки, і рівняння руху (динамічного) без інерційних членів [16]:

$$\begin{cases} \frac{dW}{dt} + Q_n - Q_e = q; & (3.1) \\ W = f(\tilde{Q}), & (3.2) \end{cases}$$

де  $W$  - об'єм води на ділянці русла довжиною  $L$ ;  
 $Q_n$  і  $Q_e$  - витрати води в вихідному і вхідному створах;  
 $q$  – боковий приплив на всій ділянці річки;  
 $\tilde{Q}$  - середньозважена витрата води на ділянці річок.

Рівняння  $W = f(\tilde{Q})$  системи – крива об'ємів.

Відмінність методів, заснованих на рішенні рівнянь (3.1) і (3.2) пов'язане з лінійним чи нелінійним виразом кривої  $W = f(\tilde{Q})$ .

Припущення про лінійну залежність між об'ємом і стоком води  $W = f(\tilde{Q})$  є основою для найпростіших методи розрахунку трансформації паводкової хвилі, що дозволяють отримати прості аналітичні рішення і тому набули більшого поширення в практиці, ніж нелінійні. У практиці короткострокових прогнозів застосовуються такі методи [14-16].

а) метод Маскінгама, запропонований Маккарті [19].

б) метод характерної ділянки, запропонований Калініним та Мілюковим [20].

в) методи розрахунку трансформації паводкових хвиль за інтегралом Дюамеля [15, 16].

Існують інші гідрологічні методи, наприклад: метод кінематичної хвилі, узагальнена лінійна модель, а також метод дифузійної аналогії [14].

В лінійних моделях розрахунок трансформації паводка на безприпливній ділянці річки здійснюється як через каскад водосховищ. Якщо річку поділити на ділянки довжиною  $\ell$ , які мають називатися характерними, то розрахунок трансформації паводка ведеться як переміщення його через низку цих ділянок.

### 3.2 Метод розрахунку трансформації паводка Маскінгам

Метод заснований на наступній залежності між обсягом та стоком [14,16]

$$W = \tau[kQ_B + (1-k)Q_H], \quad (3.3)$$

де -  $Q_B$  та  $Q_H$  витрата води у верхньому і нижньому створах, м<sup>3</sup>/с;

$\tau$  - час добігання води у руслі річки, д;

$k$  - безрозмірний коефіцієнт, що становить 0,0-0,5.

Постійні  $k$  і  $\tau$  визначаються емпірично для ділянки річки, що вивчається по даних про витрати води. Постійна  $k$  є відношенням об'єму води до її витрати. Вона приблизно дорівнює часу добігання води на ділянці. Значення  $k$  та  $\tau$  визначаються за допомогою графіка зв'язку об'єму води на ділянці від середньозваженої витрати води в верхньому та нижньому створах при різних  $k$ . Найбільш оптимальним є таке значення  $k$ , при якому нанесені

на графік точки найближче розташовані до однозначної кривої. Воно дорівнює тангенсу кута нахилу розрахункової прямої і приймається як розрахункове в (2.6) [14,16].

Витрата води у нижньому створі ділянки визначається за виразом

$$Q_{H_2} = C_0 Q_{B_2} + C_1 Q_{B_1} + C_2 Q_{H_1}, \quad (3.4)$$

де  $Q_{B_2}, Q_{B_1}$  - витрати води у верхньому створі наприкінці та на початку розрахункового інтервалу часу  $\Delta t$ ;

$Q_{H_1}$  - витрата води в нижньому створі на початку інтервалу;

$C_0, C_1, C_2$  - постійні коефіцієнти, які є функціями  $k, \tau$  та розрахункового періоду часу  $\Delta t$ .

Сума цих постійних дорівнює одиниці, тобто  $C_0 + C_1 + C_2 = 1$ . Метод Маскінгам дає задовільні результати для коротких ділянок річок, при не значних коливаннях витрат води у верхньому створі [14-16].

### 3.3 Метод розрахунку трансформації паводка Калініна-Мілюкова

Метод характерної ділянки (резервуара), запропонований Калініним та Мілюковим [20]. За умов, що витрата води ( $Q$ ) залежить як від рівня води ( $H$ ), так й ухилу водної поверхні ( $I$ ) [13]

$$Q = f(H, I). \quad (3.5)$$

Зв'язок між об'ємом води на ділянці ( $W$ ) та витратою води у нижньому створі ( $Q_H$ ) також однозначний

$$W = k Q_H. \quad (3.6)$$

Параметр  $k$  є постійною величиною об'єму, що дорівнює часу добігання на характерній ділянці  $\tau$ . Рівняння (3.6) застосовується для транзитних ділянок характерної довжини  $l$ , яка приблизно дорівнює [13]

$$l = \frac{Q_B \Delta H_B}{I_B \Delta Q_B}, \quad (3.7)$$

де  $Q_B, H_B, I_B$  - відповідно, витрата води, рівень води та ухил водної поверхні для встановленого руху річкового потоку;

$\Delta H_B / \Delta Q_B$  - ухил кривої витрат води  $Q = f(H)$  у точці, яка відповідає даній витраті води  $Q$ .

Для довгих ділянок річок  $L$  у разі відсутності достатньої кількості даних, необхідні виділення низки характерних ділянок, використовуючи формулу, що виражає трансформацію стоку системою однакових лінійних резервуарів. Якщо відрізок річки складається з кількох характерних ділянок, розрахунок виконується послідовно від верхньої характерної ділянки до нижньої [13-16].

Розрахунок трансформації ведеться від ділянки до ділянки за виразом [13]

$$Q_t = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \int_0^t Q_B e^{t/\tau} dt + Q_0 e^{-t/\tau}, \quad (3.8)$$

де  $Q_t$  і  $Q_0$  - витрати води у нижньому створі характерної ділянки у розрахунковий момент часу  $t$  та на початку розрахункового інтервалу часу;

$Q_B$  - витрата води у верхньому створі (приток на ділянку);

$\tau$  - час добігання води на характерній ділянці.

Обчислена витрата для нижнього створу  $Q_t$  першої ділянки приймається за початкову витрату  $Q_B$  для другої ділянки і т.п.

Якщо вважати, що  $\tau$  однаковий на всіх характерних ділянках, то розрахунок витрати води в кінці останньої ділянки здійснюється як [13]

$$Q_n = Q_B r(\tau), \quad (3.9)$$

де  $Q_B$  - витрата води у верхньому створі (приплив води до  $i$ -ої характерної ділянки);

$r(\tau)$  - функція трансформації (впливу) [13-16]

$$r(\tau) = \frac{\Delta t}{\tau(n-1)!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{n-1} e^{-t/\tau}, \quad (3.10)$$

де  $\tau$  - час добігання на характерній ділянці;

$n$  - число характерних ділянок;

$\Delta t$  - розрахунковий інтервал часу (взагалі  $\Delta t = 1$ );

$t$  - момент часу ( $t = 1, 2, \dots, m$ ).

Параметри  $n$  і  $\tau$  в (3.10) визначаються методом підбору чи оптимізації, Якщо  $n$  дробове значення факторіал  $(n-1)!$  замінюють на гама-функцію  $\Gamma(n)$ . Застосування комп'ютерів дуже зручно для цієї мети, в тому числі для оперативних розрахунків. Блок-схема програми та опис змінних такого розрахунку трансформації паводкової хвилі наведена на рис. 3.1. Визначення оптимальних параметрів відбувається за методом підбору (за критерієм Неша).

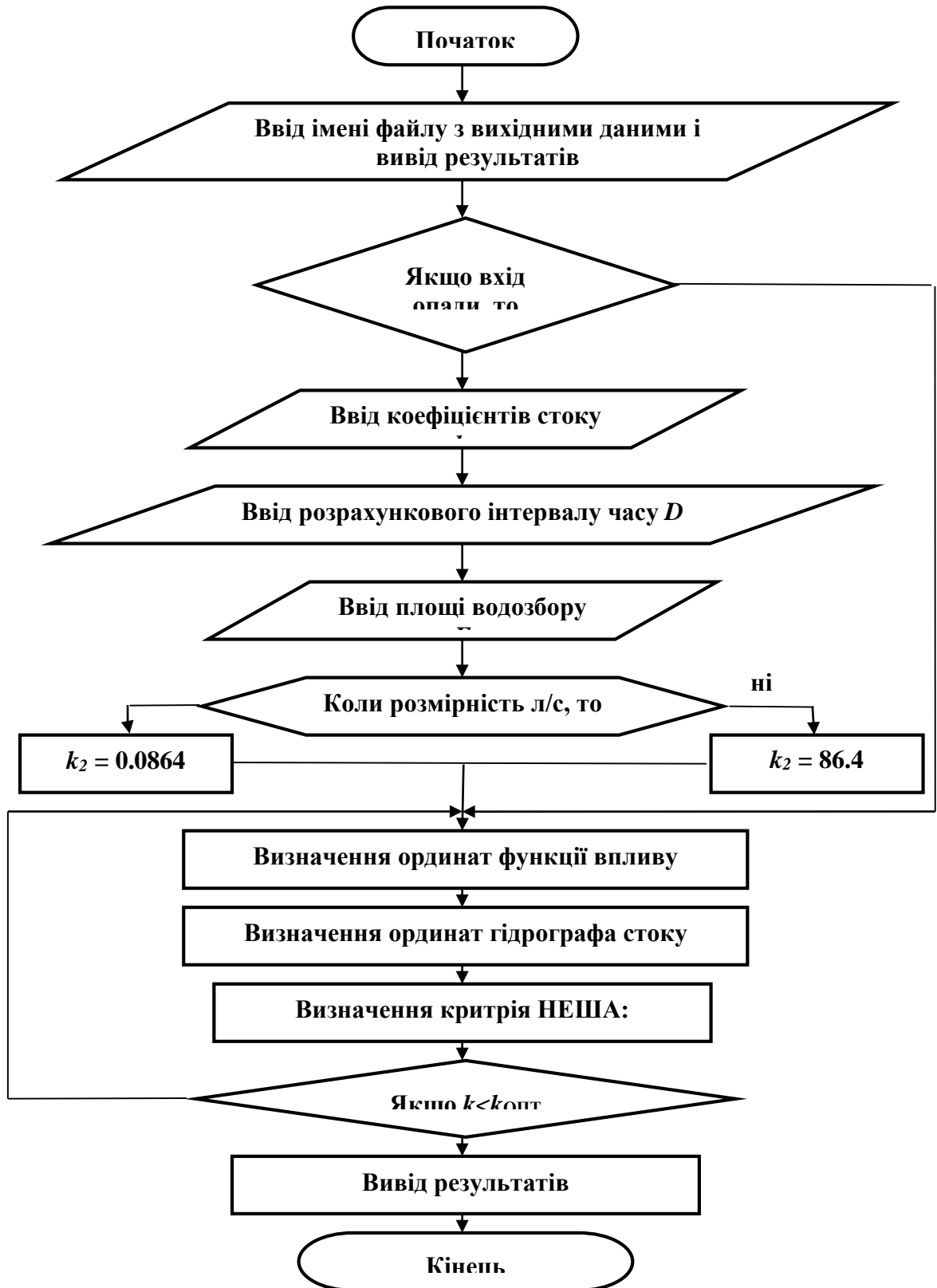


Рисунок 3.1 – Блок-схема програми визначення ординат гідрографа стоку

**Функція впливу** (крива добігання води)  $r(\tau)$  показує послідовність добігання до нижнього створу часток витрати води, яка пройшла через верхній створ за час  $\Delta t$ .

Важливою властивістю кривої добігання  $r(\tau)$  є те, що площа фігури під нею (сума ординат кривої) дорівнює одиниці. Ця властивість є умовою зберігання об'ємів води на слабо припливній ділянці річки. Характерно також, що крива добігання має максимум і при зростанні часу прямує до нуля. При розрахунках  $r(\tau)$  за формулою (3.10) сума ординат функції трансформації може бути меншою за одиниці для декількох її ординат. В [13, 16] запропонований прийом, який дозволяє здобути  $\sum r_i(\tau) = 1$ . При цьому кожна обчислену за (3.10) ординату кривої добігання поділяють на суму усіх ординат.

### 3.4 Розрахунок трансформації паводка за інтегралом Дюамеля

Для лінійної моделі процесу руху паводкової хвилі із зосередженими параметрами зв'язок між вхідною величиною  $q$  та виходом із системи  $Q$  можна представити (за нульових початкових умов - витрата води у початковий момент часу дорівнює нулю на всій розглядуваній ділянці русла) і при постійних коефіцієнтах  $n$  і  $\tau$  інтегралом Дюамеля [13, 15, 16,21]

$$Q(t) = \int_0^t q(\tau) r(t - \tau) d\tau, \quad (3.11)$$

де  $r(t - \tau)$  - функція впливу чи трансформації.

Величина притоку води у руслову мережу (вхідна функція)  $q$  може виражатися як кількість випавших на басейн опадів  $X$ , які формують паводок

(з введенням коефіцієнту стоку, що враховує втрати води на водозборі), або прийматися як витрата води у верхньому створі  $Q_B$ .

Для оперативного прогнозування гідрографу стоку у замикальному створі річки (ділянка слабкоприпливна) при вхідній витраті верхнього створу ( $Q_B$ ) використовується функція  $r(\tau)$  та інтеграл Дюамеля (3.11) у вигляді [13,16,21]

$$Q(t) = \int_0^t Q_B(t-\tau) r(\tau) d\tau \quad (3.12)$$

або

$$Q_t = \sum_{\tau=0}^{\tau_{mp}} r_{\tau} Q_{B_{t-\tau_0-\tau}}, \quad (3.13)$$

де  $r_{\tau}$  - ординати кривої добігання води по руслу;

$Q_B$  - витрата води у верхньому створі у момент  $t - \tau_0 - \tau$ ;

$\tau$  - час добігання витрати води, яка дорівнює  $r_{\tau}$ ;

$\tau_0$  - час, за який зміна витрати води у верхньому створі не впливає на витрату води у нижньому створі.

У формулі (3.13)  $\tau_0$  приймається рівним нулю.

Таким чином, розрахунок витрат води у замикаючому створі за формулою (3.13) має такі етапи:

1) Для визначення функції  $r_{\tau}$  використовується формула (3.10). Параметри  $n$  і  $\tau$  визначаються шляхом розрахунку ([21] або за методом оптимізації).

2) За нульових початкових умов з витрати води  $Q_B$  в момент часу  $t - \tau$  виключається підземна складова ( $Q_{БАЗ}$ ), тобто визначається поверхневий приток води на ділянку (витрата води, м<sup>3</sup>/с) за виразом

$$q = Q_B - Q_{БАЗ}. \quad (3.14)$$

3) Кожна величина притока води на ділянку  $q$  помножується на всі ординати відповідної кривої добігання  $r_\tau$ .

4) Підсумовуються визначені добутки по рядкам з умовою підземної складової за період паводку  $T_{II}$  за виразом

$$Q_P = \sum_{i=1}^{T_{II}} Q_i + Q_{БАЗ}. \quad (3.15)$$

5) Виконується оцінка розрахунків трансформації паводкової хвилі:

а) при визначенні бокового притоку (за співвідношенням об'ємів паводку на вході у верхньому створі  $W_{вх}$  і виході у замикаючому створі ( $W_{вих}$ ))

$$k_{\bar{\sigma}} = \frac{W_{вих}}{W_{вх}}, \quad (3.16)$$

за співвідношенням фактичного  $W_{вих}$  і розрахункового ( $W'_{вих} * k_{\bar{\sigma}}$ ) об'ємів паводка на виході

$$\delta W = \frac{W'_{вих} * k_{\bar{\sigma}}}{W_{вих}}. \quad (3.17)$$

б) за критерієм Неша, як  $(1 - S / \sigma)$  ( $S$  - середньоквадратична похибка прогнозу;  $\sigma$  - середньоквадратичне відхилення прогнозової величини від середнього) [22,23]:

- середньоквадратична похибка прогнозу

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i')^2}{n}}, \quad (3.18)$$

де  $Y_i'$  - прогнозне значення величини  $Y_i$ ;

- середнє квадратичне відхилення

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}, \quad (3.19)$$

де  $Y_i$  – значення прогнозованої величини;

$\bar{Y}$  – середнє багаторічне значення прогнозованої величини;

$n$  – кількість членів ряду;

- критерій Неша  $(1 - S / \sigma)$ , який повинний прямувати до одиниці.

б) Будується гідрографи паводка за фактичними витратами води у верхньому  $Q_B$  та за фактичними  $Q_H$  і розрахунковими  $Q_H' * k_0$  витратами води нижньому створі.

Якщо розбіжності між спостереженим і розрахованим гідрографами стоку суттєві, необхідно дещо змінити параметри кривої трансформації  $n$  і  $\tau$ .

При цьому доцільно враховувати:

- 1) при збільшенні параметра  $\tau$  та незмінному значенні  $n$  збільшується трансформація гідрографу, тобто зниження максимуму (при його зміщенні праворуч);
- 2) при збільшенні параметра  $n$  та незмінному значенні  $\tau$  трансформація зменшується (також при зміщенні максимуму праворуч).

## **4 РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАЦІЇ ПАВОДКІВ НА Р.ДНІСТЕР ВІД М. МОГИЛЬОВ-ПОДІЛЬСЬКИЙ ДО С.ГРУШКА**

### **4.1 Вихідні дані до розрахунку трансформації паводку**

В якості вихідних даних до розрахунку трансформації паводку на р.Дністер від створу м.Могильов-Подільський до замикаючого створу с.Грушка прийняті дані про щоденні витрати води в період проходження паводків в різні роки (2001, 2007, 2012, 2015, 2019 рр.) за даними режимних видань чи одержані з бази оперативної щоденної інформації УкрГМЦ АРМ-гідро за рекомендаціями в [24] (Дод. А). При цьому створено вихідну електронну базу даних в середовищі EXEL.

В якості вихідних даних також залучена типова крива спаду витрат води на р. Дністер у вхідному створі м.Могильов-Подільський (табл. 4.1)

Розрахунковий інтервал часу прийнятий  $\Delta t = 1$  доба.

#### 4.2 Визначення ординат трансформаційної функції

Прийнята формула для розрахунку функції трансформації  $r(\tau)$  має вигляд

$$r(\tau) = \frac{\Delta t}{\tau(n-1)!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{n-1} e^{-t/\tau}, \quad (4.1)$$

де  $\tau$  - час добігання на характерній ділянці;

$n$  - число характерних ділянок;

$\Delta t$  - розрахунковий інтервал часу (взагалі  $\Delta t = 1$ );

$t$  - момент часу ( $t = 1, 2, \dots, m$ ).

Таблиця 4.1 - Ординати типової кривої спаду для р. Дністер – м.Могильов-Подільський

Момент спаду	$Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$
0	320

1	300
2	278
3	256
4	230
5	212
6	188
7	166
8	156
9	149
10	143
11	136
12	130
13	125
14	122
15	118
16	110
17	107
18	103
19	100
20	95

Враховуючи властивість збереження об'ємів води на без припливній ділянці річки, при розрахунках  $r(\tau)$  сума ординат функції повинна дорівнювати одиниці - об'єм води, що надійшов на ділянку через час руслового добігання вийде з ділянки через замикальний ствір. В табл. 4.1 представлений розрахунок, який дозволяє отримати  $\sum r_i(\tau) = 1$ . З цією метою кожен обчислену ординату кривої добігання поділяємо на суму усіх ординат.

Розрахунки для різних значень параметрів  $n$  і  $\tau$  функції добігання в (4.1) наведені у табл.4.2 - табл. 4.4. Як можна бачити з таблиць розрахунків при кожних значення параметрів сума  $\sum r_i(\tau) = 1$ .

Таблиця 4.2 – Ординати кривої добігання при  $n = 1$  і  $\tau = 1$

Спосіб здобуття ординати	Номер ординати							Сума
	r(1)	r(2)	r(3)	r(4)	r(5)	r(6)	r(7)	
за формулою (4.1)	0,368	0,135	0,050	0,018	0,007	0,002	0,001	0,581
від ділення на суму ординат	0,633	0,233	0,086	0,032	0,012	0,004	0,002	1,0

Таблиця 4.3 – Ординати кривої добігання при  $n = 2$  і  $\tau = 1$ 

Спосіб здобуття ординати	Номер ординати									Сума
	r(1)	r(2)	r(3)	r(4)	r(5)	r(6)	r(7)	r(8)	r(9)	
За формулою (4.1)	0,368	0,271	0,149	0,073	0,034	0,015	0,006	0,003	0,001	0,920
від ділення на суму ординат	0,400	0,294	0,162	0,080	0,037	0,016	0,007	0,003	0,001	1,0

Таблиця 4.4 – Ординати кривої добігання при  $n = 3$  і  $\tau = 1$ 

Спосіб здобуття ординати	Номер ординати											Сума
	r(1)	r(2)	r(3)	r(4)	r(5)	r(6)	r(7)	r(8)	r(9)	r(10)	r(11)	
за формулою (4.1)	0,184	0,271	0,224	0,147	0,084	0,045	0,022	0,011	0,005	0,002	0,001	0,994
від ділення на суму ординат	0,185	0,272	0,225	0,147	0,085	0,045	0,022	0,011	0,005	0,002	0,001	1,0

### 4.3 Розрахунок трансформації паводків і прогноз гідрографа дощового паводку р.Дністер у с.Грушки за інтегралом Дюамеля

Розрахунок трансформації паводкової хвилі і прогноз гідрографа дощового паводку у замикаючому створі р. Дністер - с.Грушки у випадку

нульових початкових умов (кількість води в руслі на початку паводку дорівнює нулю) ведемо за інтегралом Дюамеля за формулою

$$Q(t) = \int_0^t Q_B(t - \tau) r(\tau) d\tau \quad (4.2)$$

Розрахунки і прогноз витрат води у замикаючому створі р. Дністер - с.Грушки за даним про витрати води у вхідному створі р. Дністер - м.Могильов-Подільський здійснюється в такі етапи і представляється у табульованому і графічному вигляді:

1) Визначаємо ординати кривої добігання  $r(\tau)$  за (4.1) за оптимальних параметрів  $n$  і  $\tau$ , що відбувається за методом підбору (за критерієм Неша збіжності розрахункового і фактичного гідрографів паводку у створі с.Грушка) за програмою (блок-схема програми та опис змінних представлені на рис.3.1). Ординати кривої добігання для даного паводку встановлені при  $n = 2$  і  $\tau = 1$ .

2) Для завдання нульових початкових умов виключаємо підземну складову ( $Q_{БАЗ}$ ) із витрати води верхнього створу р. Дністер - м.Могильов-Подільський  $Q_B$  в момент часу  $t - \tau$ , тобто розрахунки ведемо по поверхневому притоку води на ділянку річки Дністер (поверхнева витрата води, м<sup>3</sup>/с) за виразом

$$q = Q_B - Q_{БАЗ}. \quad (4.3)$$

3) Кожну величину притоку води  $q$  на ділянку р. Дністер - м.Могильов-Подільський - с. Грушка помножуємо на всі ординати відповідної кривої добігання  $r_\tau$  за інтегралом Дюамеля (4.2).

4) Підсумовуємо визначені добутки по рядкам з додаванням підземної складової за період паводку  $T_{II}$  в замикаючому створі р. Дністер - с.Грушки за виразом

$$Q_P = \sum_{i=1}^{T_{II}} Q_i + Q_{БАЗ} . \quad (4.4)$$

5) Визначаємо боковий приплив води  $k_{\bar{o}}$  за співвідношенням об'ємів паводку на вході у верхньому створі  $W_{вх}$  р.Дністер - м.Могильов-Подільський і виході у замикаючому створі  $W_{вих}$  р. Дністер - с.Грушка за

$$k_{\bar{o}} = \frac{W_{вих}}{W_{вх}} . \quad (4.5)$$

б) Таким, чином отримаємо спрогнозований гідрограф паводку р. Дністер - с.Грушка. Результати розрахунків і прогнозу витрат води у нижньому створі за період паводка 2019 р. представлені у табл.4.5.

#### **4.4 Оцінка розрахунків і прогнозу трансформації паводкової хвилі замикаючого створу р. Дністер - с.Грушка**

Виконуємо оцінку розрахунків і прогнозу трансформації паводкової хвилі за витратами води нижнього замикаючого створу р. Дністер - с.Грушка з урахуванням бокового припливу на ділянці річки.

Таблиця 4.5 – Розрахунок і прогноз трансформації паводка за інтегралом Дюамеля на р.Дністер –с.Грушка у 2019 р.

№ з/п	Дата	Витрата води, м <sup>3</sup> /с		Приток води на ділянку, $q$ , м <sup>3</sup> /с	Функція трансформації, $r(\tau)$	Витрати води, м <sup>3</sup> /с							Похибка, м <sup>3</sup> /с $\delta = Q_H - (Q'_H * k_{\delta})$	$\delta^2$ , м <sup>3</sup> /с	
		$Q_B$	$Q_{BAZ}$			$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	....	$\Sigma Q_i$	$Q'_H$	$Q'_H * k_{\delta}$			$Q_H$
1	2	3	4	5	6	7	8	9		21	22	23	24	25	26
1	1/VII	278	278	0	0,294	0			...	0	278	310	361	51	2601
2	2/VII	1200	256	944	0162	0	378			378	634	706	352	-354	125316
3	3/VII	2450	230	2220	0,08	0	278	888		1165	1396	1556	1840	284	80656
4	4/VII	2680	212	2468	0,037	0	153	653		1792	2005	2236	2540	304	92416
5	5/VII	3370	190	3180	0,016	0	75,5	360		2432	2623	2925	2980	55	3025
6	6/VII	3230	190	3040	0,007	0	34,9	178		2763	2953	3292	3360	68	4624
7	7/VII	2690	190	2500	0,003	0	15,1	82,1		2704	2893	3226	3080	-146	21316
8	8/VII	2140	190	1950	0,001	0	6,61	35,5		2395	2585	2882	2630	-252	63504
9	9/VII	1790	190	1600			2,83	15,5		2037	2227	2482	2180	-302	91204
10	10/VII	1520	190	1330			0,94	6,66		1627	1817	2113	1950	-163	26569
11	11/VII	1260	190	1070				2,22		1321	1511	1780	1630	-150	22500
12	12/VII	1020	190	830						1074	1264	1477	1290	-187	34969
13	13/VII	945	190	755						915	1105	1266	1140	-126	15876
14	14/VII	808	190	618						772	962	1091	1030	-61	3721
15	15/VII	705	190	515						649	839	944	913	-31	961
16	16/VII	612	190	422						541	731	819	805	-14	196
17	17/VII	576	190	386						464	654	731	702	-29	841
18	18/VII	584	190	394						426	616	687	681	-6	36

Продовження табл.4.5

№ з/п	Дата	Витрата води, м <sup>3</sup> /с		Приток води на ділянку, $q$ , м <sup>3</sup> /с	Функція трансформації, $r(\tau)$	Витрати води, м <sup>3</sup> /с					$\delta = Q_H - (Q'_H * k_{\bar{\sigma}})$	$\delta^2$ , м <sup>3</sup> /с	
		$Q_B$	$Q_{BAZ}$			...	$Q_{24}$	$\Sigma Q_i$	$Q'_H$	$Q'_H * k_{\bar{\sigma}}$			$Q_H$
19	19/VII	489	190	299				370	560	624	657	33	1089
20	20/VII	409	190	219				302	492	548	558	10	100
21	21/VII	359	190	169				239	429	478	480	2	4
22	22/VII	347	190	157				198	388	432	443	11	121
23	23/VII	341	190	151				173	363	405	434	29	841
24	24/VII	335	190	145			58,0	159	349	389	415	26	676
25	25/VII						42,7	93,1	283	316	403	87	7569
26	26/VII						23,5	46,9	237	264	382	118	13924
27	27/VII						11,5	21,8	212	236	360	124	15376
28	28/VII						5,31	9,6	200	223			
							2,34	4,05	194	216			
							1,01	1,64	192	214			
							0,42	0,61	191	212			
							0,18	0,18	190	212			
		$W_{ex} =$ 30138 м <sup>3</sup>								$W'_{eux} * k_{\bar{\sigma}} =$ 35290 м <sup>3</sup>	$W_{eux} =$ 33596 м <sup>3</sup>	$S =$	153 м <sup>3</sup> /с
												$S/\sigma =$	0,16
										$k_{\bar{\sigma}} =$	1,11	$(1-S/\sigma) =$	0,84
										$(W'_{eux} * k_{\bar{\sigma}}) /$ $W_{eux} =$	1,05		

а) за співвідношенням фактичного  $W_{вих}$  і розрахункового ( $W'_{вих} * k_{\delta}$ ) об'ємів паводка на виході як

$$\delta W = \frac{W'_{вих} * k_{\delta}}{W_{вих}}. \quad (4.6)$$

При цьому величина  $\delta W$  повинна бути близькою до одиниці (табл.4.5).

б) за критерієм Неша, як  $(1 - S / \sigma)$  ( $S$  - середньоквадратична похибка прогнозу;  $\sigma$  - середньоквадратичне відхилення прогнозної величини від середнього):

- середньоквадратична похибка прогнозу за

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{H_i} - Q'_{H_i} * k_{\delta})^2}{n}}, \quad (4.7)$$

де  $Q'_{H_i}$  - прогнозне значення витрати води  $Q_{H_i}$  ;

- середнє квадратичне відхилення витрат води розраховуємо в табл.3.6 за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{H_i} - \bar{Q}_H)^2}{n-1}}, \quad (4.8)$$

де  $Q_{H_i}$  – значення прогнозованої величини витрати води;

$\bar{Q}_H$  – середнє багаторічне значення прогнозної величини витрати води;

$n$  – кількість членів ряду;

- критерій Неша  $(1 - S / \sigma)$ , який повинний прямувати до одиниці.

Таблиця 4.6 – Розрахунок середньоквадратичного відхилення витрат води при розрахунку трансформації паводка за інтегралом Дюамеля на р.Дністер – с.Грушка

№ з/п	Дата	Витрати води, м <sup>3</sup> /с $Q_H$ ,	Відхилення витрат води від середнього, м <sup>3</sup> /с	
			$(Q_H - \bar{Q}_H)$	$(Q_H - \bar{Q}_H)^2$
1	1/VII	361	-883	779689
2	2/VII	352	-892	795664
3	3/VII	1840	596	355216
4	4/VII	2540	1296	1679616
5	5/VII	2980	1736	3013696
6	6/VII	3360	2116	4477456
7	7/VII	3080	1836	3370896
8	8/VII	2630	1386	1920996
9	9/VII	2180	936	876096
10	10/VII	1950	706	498436
11	11/VII	1630	386	148996
12	12/VII	1290	46	2116
13	13/VII	1140	-104	10816
14	14/VII	1030	-214	45796
15	15/VII	913	-331	109561
16	16/VII	805	-439	192721
17	17/VII	702	-542	293764
18	18/VII	681	-563	316969
19	19/VII	657	-587	344569
20	20/VII	558	-686	470596
21	21/VII	480	-764	583696
22	22/VII	443	-801	641601
23	23/VII	434	-810	656100
24	24/VII	415	-829	687241
25	25/VII	403	-841	707281
26	26/VII	382	-862	743044
27	27/VII	360	-884	781456
		середнє значення $\bar{Q}_H$ =1244 м <sup>3</sup> /с		$\Sigma (Q_H - \bar{Q}_H)^2$ = 24504084

				$\sigma = 971 \text{ м}^3/\text{с}$
--	--	--	--	-------------------------------------

Будуємо гідрографи паводку за фактичними витратами води у верхньому створі р.Дністер - м.Могильов-Подільський  $Q_B$  та за фактичними  $Q_H$  і розрахунковими  $Q'_H * k_{\sigma}$  витратами води нижньому створі р.Дністер - с.Грушка за даними табл.4.5, що показані на рис.4.1.

Таким чином, виконаний розрахунок трансформації і здійснений прогноз витрат води за період дощового паводку р.Дністер - с.Грушка при використанні методу розрахунку за інтегралом Дюамеля.

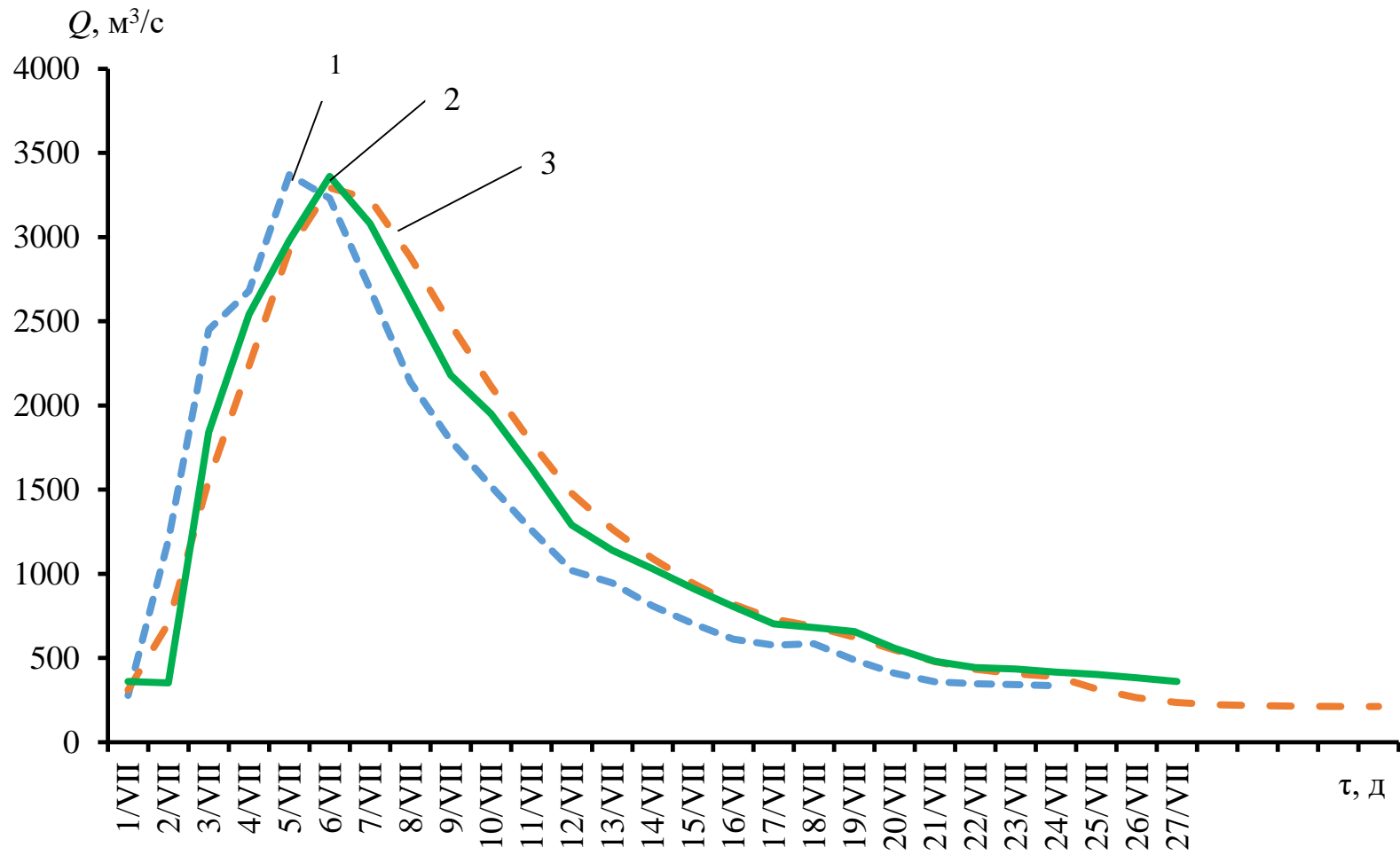
При цьому ординати кривої добігання для даного паводку встановлені при  $n = 2$  і  $\tau = 1$ , визначений боковий приплив на ділянці на р.Дністер від м.Могильов-Подільський до с.Грушка  $k_{\sigma} = 1,11$ .

Встановлене співвідношення фактичного  $W_{вих}$  і розрахункового ( $W'_{вих} * k_{\sigma}$ ) об'ємів паводку на виході у с. Грушка  $\delta W = 1,05$ , тобто похибка розрахунку об'єму дощового паводку становить 5%.

При оцінці прогнозу витрат води у замикаючому створі р.Дністер - с.Грушка середньоквадратичне відхилення ординат розрахункового гідрографа від фактичного  $\bar{S} = 153 \text{ м}^3/\text{с}$ ; середньоквадратичне відхилення витрат води від норми  $\sigma = 971 \text{ м}^3/\text{с}$ ; співвідношення  $S / \sigma = 0,16$ . Критерій Неша  $(1 - S / \sigma)$  дорівнює 0,84, тобто одержана добра збіжність ординат розрахункового з фактичним гідрографом на р.Дністер - с.Грушка.

Був також виконаний розрахунок трансформації і здійснений прогноз витрат води за період дощового паводку р.Дністер - с.Грушка при використанні методу розрахунку за інтегралом Дюамеля й в інші роки.

Результати прогнозування дощових паводків р.Дністер - с.Грушка з урахуванням трансформації паводку та бокового припливу води на ділянці річки й в інші роки виконані в електронному вигляді та представлені на графіках збіжності фактичного й спрогнозованого гідрографів стоку та у вигляді оцінки прогнозу гідрографів за критеріями якості прогнозів у дод. Б.



1 -  $Q_B$  м. Могильов-Подільський; 2 -  $Q_H$  с. Грушка; 3 -  $Q'_H * k_б$  с. Грушка

Рисунок 4.1 - Збіжність фактичних і спрогнозованого гідрографів дощового паводку р. Дністер у 2019 р.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи розроблена та доведена до практичного використання методика розрахунку трансформації паводкових хвиль і прогноз гідрографа дощового паводка на ділянці р.Дністер на ділянці від м.Могильов-Подільський до с.Грушка з урахуванням бічного припливу води під час проходження паводку, виконана оцінка методики і розроблена схема випуску прогнозу щоденних рівнів води паводка на р. Дністер.

Крім того можна зробити такі основні висновки.

1. Річка Дністер найбільша річка Західної України і Молдови. Бере початок в українських Карпатах, тече по території Молдови і досягає України в районі Чорного моря. У формуванні клімату в верхній та середній ділянці басейну велику роль відіграють Карпати і Волинська височина. Південні райони басейну належать до Чорноморської кліматичної підобласті. В цілому в басейні Дністра взимку випадає 10-20 % річних опадів, влітку – 35-45 %, навесні і восени – 20-25 %.

Підвищене зливеве навантаження на північно-східних схилах Карпатських гір обумовлює надмірне зволоження ґрунту, що викликає численні паводки, і становить характерну особливість паводкового режиму Дністра в цілому.

2. Розрахунок трансформації паводкових хвиль при їх русі по руслах і водосховищах проводиться різними методами, що ґрунтуються на вирішенні рівнянь нерозривності та енергії - системи рівнянь Сен-Венана. Найпростіші методи розрахунку трансформації паводкової хвилі засновані на припущення про лінійну залежність між об'ємом води і стоком, що дозволяє отримати аналітичні рішення. До лінійних моделей можна віднести методи розрахунку трансформації паводкових хвиль за інтегралом Дюамеля, методом Калініна-Мілюкова, методом Маскінгам.

3. В роботі виконаний розрахунок трансформації і здійснений прогноз витрат води за період дощового паводку (на прикладі 2019 р.) на р.Дністер від

м.Могильов-Подільський до с.Грушка. При цьому розраховані ординати кривої добігання при різних сполученнях параметрів  $n$  і  $\tau$  за формулою Г.П.Калініна-М.Ф.Мілюкова, сума яких дорівнює одиниці. Визначений боковий приплив на ділянці на р.Дністер від м. Могильов-Подільський до с.Грушка.

4. Отримана похибка розрахунку об'єму дощового паводку р.Дністер - с.Грушка, яка становить 5%.

При оцінці прогнозу витрат води у замикаючому створі р.Дністер - с.Грушка:

- середньоквадратичне відхилення ординат розрахункового гідрографа від фактичного  $\bar{S} = 153 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

- середньоквадратичне відхилення витрат води від норми  $\sigma = 971 \text{ м}^3/\text{с}$ ; співвідношення  $S / \sigma = 0,16$ .

- Критерій Неша  $(1 - S / \sigma)$  дорівнює 0,84, тобто

- одержана добра збіжність ординат розрахункового з фактичним гідрографом на р.Дністер - с.Грушка.

5. Був також виконаний розрахунок трансформації і здійснений прогноз витрат води за період дощового паводку р.Дністер - с.Грушка при використанні методу розрахунку за інтегралом Дюамеля й в інші роки.

В роботі представлені результати прогнозування дощових паводків р.Дністер - с.Грушка з урахуванням трансформації паводку та бокового припливу води на ділянці річки й в інші роки у вигляді графіків збіжності фактичного й спрогнозованого гідрографів стоку та у вигляді оцінки прогнозу гідрографів за критеріями якості прогнозу.

### Перелік посилань

1. Вишневський В.І. Річки і водойми України. Стан і використання: монографія. Київ: Віпол, 2000. 376 с.
2. Швєбс Г.І., Ігошин М.І. Каталог річок і водойм України: навчально – довідниковий посібник. Одеса: Астропринт, 2003. 392 с.
3. Ресурси поверхневих вод СРСР, том 6 (Україна, Молдова), Випуск 1, Західна Україна та Молдова. Ленінград: Гідрометеоздат, 1969 р.
4. Заставний Ф.Д. Фізична географія України. Львів: Обласний інститут освіти, 1996. 231 с.
5. Паламарчук М.М. Закорчевна Н.Б. Водний фонд України (Довідковий посібник): Київ: Ніка-Центр, 2001. 388 с.
6. Атлас України / кер. проекту Л.Г. Руденко, В.С. Чабанюк, А.І. Бочковська / Інститут географії Національної академії наук України і Товариство з обмеженою відповідальністю «Інтелектуальні системи ГЕО», 1999–2000. URL: <http://www.isgeo.kiev.ua>
7. Водне господарство в Україні / За ред. А.В. Яцика, В.М. Хорева. Київ: Генеза, 2000. 456 с.
8. Клімат України / За ред. В.М.Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. Київ: Вид-но Раєвського, 2003. 343 с.
9. Кліматичний кадастр України (6ч.). Державна гідрометеорологічна служба. Київ: 2006, електронний ресурс.: [climate\\_cgo@inbox.ru](mailto:climate_cgo@inbox.ru) .

10. Вишневський В.І., Косовець О.О. Гідрологічні характеристики річок України. Київ: Ніка – Центр, 2003. 324 с.
11. Дигас О.В. Особливості гідрологічних умов на річках території, що обслуговується ГМЦ ЧАМ, у 2020-2023 рр. *Матеріали XXIII Наукової конференції молодих вчених Одеського державного екологічного університету*, 22 - 26 квітня. Одеса : ОДЕКУ. 2024. С. 85-86.  
<https://drive.google.com/file/d/1bXzXwlMEdvnVSriDpGePA-b7ESvMDbRN/view>
12. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2016-2020 рр. та весь період спостережень). Ч. 1. Річки. Вип. 1. Басейн Вісли, Дунаю, Дністра, Південного Бугу, річки Причорномор'я: довідкове видання. Київ, 2023. 467 с.
13. Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни "Гідрологічні прогнози" за темою «Короткострокові прогнози водного режиму річок» для студентів IV курсу очної та заочної форм навчання за напрямом 6.040105 «Гідрометеорологія», спеціальність «Гідрологія» / Шакірзанова Ж.Р., Погорілова М.П., Будкіна І.Є. Одеса, ОДЕКУ, 2014. 81 с.
14. Guide to hydrological practices. Data acquisition and processing, analysis, forecasting and other applications. WMO-No. 168. Fifth edition. World Meteorological Organization, 1994. 770 p.
15. Лобода Н.С. Гідрологічні прогнози: конспект лекцій Одеса, Видавництво «ТЭС», 2009. 172 с.
16. Шакірзанова Ж.Р., Бурлуцька М.Е. Гідрологічні розрахунки і прогнози: Конспект лекцій. Одеса: Вид. ТЕС, 2017. 156 с.
17. Fread, D. L., 1973: Technique for implicit dynamic routing in rivers with major tributaries. *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 4.
18. Barnes, H. H., 1967: Roughness characteristics of natural channels. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849*, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

19. Cunge, J. A., Holly, E. and Verwey, A. 1980: *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Publishing Inc., Marshfield, Massachusetts.

20. McCarthy, G. T., 1938: *The Unit Hydrograph and Flood Routing*. Paper presented at the conference of the North Atlantic Division, U.S. Corps of Engineers, June (see also *Engineering Construction — Flood Control*, 1940, The Engineer School, Ft. Belvoir, Virginia., pp. 147–156).

21. Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни «Гідрологічні та морські прогнози» за темою «Короткострокові прогнози водного режиму річок» для студентів IV курсу денної та заочної форм навчання спеціальності 103 «Науки про Землю», ОПІ «Гідрометеорологія», РВО бакалавр / Шакірзанова Ж.Р., д-р геогр. наук, проф., Докус А.О., канд. геогр. наук, ст. викл., Кущенко Л.В., ст.викл. Одеса, ОДЕКУ, 2023. 81 с.

<http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/12237>

22. Настанова з оперативної гідрології. Прогнози режиму вод суші. Гідрологічне забезпечення і обслуговування / Керівний документ. – Київ.: Український гідрометеорологічний центр, 2012. 120 с.

23. Оцінювання якості методики та точності (справджуваності) прогнозів режиму поверхневих вод суші / Керівний документ. – Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2015. 70 с.

24. Методичні вказівки до чергувань з дисципліни «Гідрологічні прогнози» по темі: «Керівництво роботи з автоматизованим робочим місцем гідролога-прогнозиста АРМ-гідро» для студентів IV-V курсів денної форми навчання за спеціальністю «Гідрологія» / Шакірзанова Ж.Р., Бойко В.М., Погорелова М.П., Будкіна І.Є., Арестова О.В. Одеса, ОДЕКУ, 2012. 58 с.

Додатки

## Додаток А

Вихідні дані для розрахунку трансформації паводка  
за інтегралом Дюамеля р.Дністер – м. М.Подільський – с. Грушка  
Таблиця А.1. - Щоденні витрати води за період проходження паводка  
р.Дністер – м. М.Подільський – с. Грушка у 2001 р.

Дата	Витрата води у верхньому створі, $Q_B, \text{ м}^3/\text{с}$	Витрата води у нижньому створі, $Q_H, \text{ м}^3/\text{с}$	Ординати кривої спаду, $Q_t, \text{ м}^3/\text{с}$
1.07	219	205	
2.07	230	217	
3.07	260	239	
4.07	492	298	
5.07	524	526	
6.07	455	555	
7.07	591	491	
8.07	623	609	
9.07	649	586	
10.07	1300	821	
11.07	1820	1490	
12.07	1360	1600	
13.07	830	1080	
14.07	689	812	
15.07	556	656	
16.07	492	567	
17.07	325	498	
18.07	353	345	
19.07		318	

20.07		280	
21.07		263	
22.07		295	
23.07		290	
n=2; $\tau=1$ доба; $Q_6 = 172 \text{ м}^3/\text{с}$			

Таблиця А.2 - Щоденні витрати води за період проходження паводка  
р.Дністер – м. М.Подільський – с. Грушка у 2007 р.

Дата	Витрата води у верхньому створі, $Q_B, \text{ м}^3/\text{с}$	Витрата води у нижньому створі, $Q_H, \text{ м}^3/\text{с}$	Ординати кривої спаду, $Q_t, \text{ м}^3/\text{с}$
1.08	218	222	
2.08	548	256	
3.08	1460	980	
4.08	1390	1470	
5.08	902	1180	
6.08	681	862	
7.08	422	682	
8.08	400	520	
9.08	344	348	
10.08	335	383	
11.08	310	361	
12.08	294	359	
13.08	270	324	
14.08	247	298	
15.08	234	277	
16.08		261	
17.08		248	
18.08		233	
19.08		220	
20.08		210	
21.08		200	
22.08		195	

$$n=2; \quad \tau=1 \text{ доба}; \quad Q_6 = 165 \text{ м}^3/\text{с}$$

Таблиця А.3. - Щоденні витрати води за період проходження паводка  
р.Дністер – м. М.Подільський – с. Грушка у 2012 р.

Дата	Витрата води у верхньому створі, $Q_B, \text{ м}^3/\text{с}$	Витрата води у нижньому створі, $Q_H, \text{ м}^3/\text{с}$	Ординати кривої спаду, $Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$
1.09	236	195	
2.09	721	211	
3.09	1830	248	
4.09	1710	1050	
5.09	1140	1720	
6.09	826	1360	
7.09	631	978	
8.09	528	753	
9.09	455	607	
10.09	397	527	
11.09	344	455	
12.09	316	396	
13.09	302	361	
14.09	294	324	
15.09	267	302	
16.09	258	280	
17.09	253	261	
18.09		242	
19.09		232	
$n=3; \quad \tau=1 \text{ доба}; \quad Q_6 = 154 \text{ м}^3/\text{с}$			

Таблиця А.4 - Щоденні витрати води за період проходження паводка  
р.Дністер – м. М.Подільський – с. Грушка у 2015 р.

Дата	Витрата води у верхньому створі, $Q_B$ , м <sup>3</sup> /с	Витрата води у нижньому створі, $Q_H$ , м <sup>3</sup> /с	Ординати кривої спаду, $Q_i$ , м <sup>3</sup> /с
1.07	310	312	
2.07	559	764	
3.07	1800	1050	
4.07	1720	1440	
5.07	1270	1400	
6.07	988	1004	
7.07	822	864	
8.07	673	644	
9.07	567	566	
10.07	531	505	
11.07	461	447	
12.07	406	400	
13.07	375	354	
14.07	344	330	
15.07	319	309	
16.07	310	306	
17.07		300	
18.07		293	
19.07		288	
20.07		275	
21.07		290	

$$n=2; \quad \tau=1 \text{ доба}; \quad Q_6 = 170 \text{ м}^3/\text{с}$$

Таблиця А.5 - Щоденні витрати води за період проходження паводка  
р.Дністер – м. М.Подільський – с. Грушка у 2019 р.

Дата	Витрата води у верхньому створі, $Q_B, \text{ м}^3/\text{с}$	Витрата води у нижньому створі, $Q_H, \text{ м}^3/\text{с}$	Ординати кривої спаду, $Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$
1.07	278	361	
2.07	1200	352	
3.07	2450	1840	
4.07	2680	2540	
5.07	3370	2980	
6.07	3230	3360	
7.07	2690	3080	
8.07	2140	2630	
9.07	1790	2180	
10.07	1520	1950	
11.07	1260	1630	
12.07	1020	1290	
13.07	945	1140	
14.07	808	1030	
15.07	705	913	
16.07	612	805	
17.07	576	702	
18.07	584	681	
19.07	489	657	
20.07	409	558	
21.07	359	480	
22.07	347	443	
23.07	341	434	
24.07	335	415	
25.07		403	

26.07		382	
27.07		360	
$n=2; \quad \tau=1 \text{ доба}; \quad Q_6 = 190 \text{ м}^3/\text{с}$			

## Додаток Б

Збіжність спостережених і спрогнозованого гідрографів дощового паводку  
на р. Дністер - с. Грушка

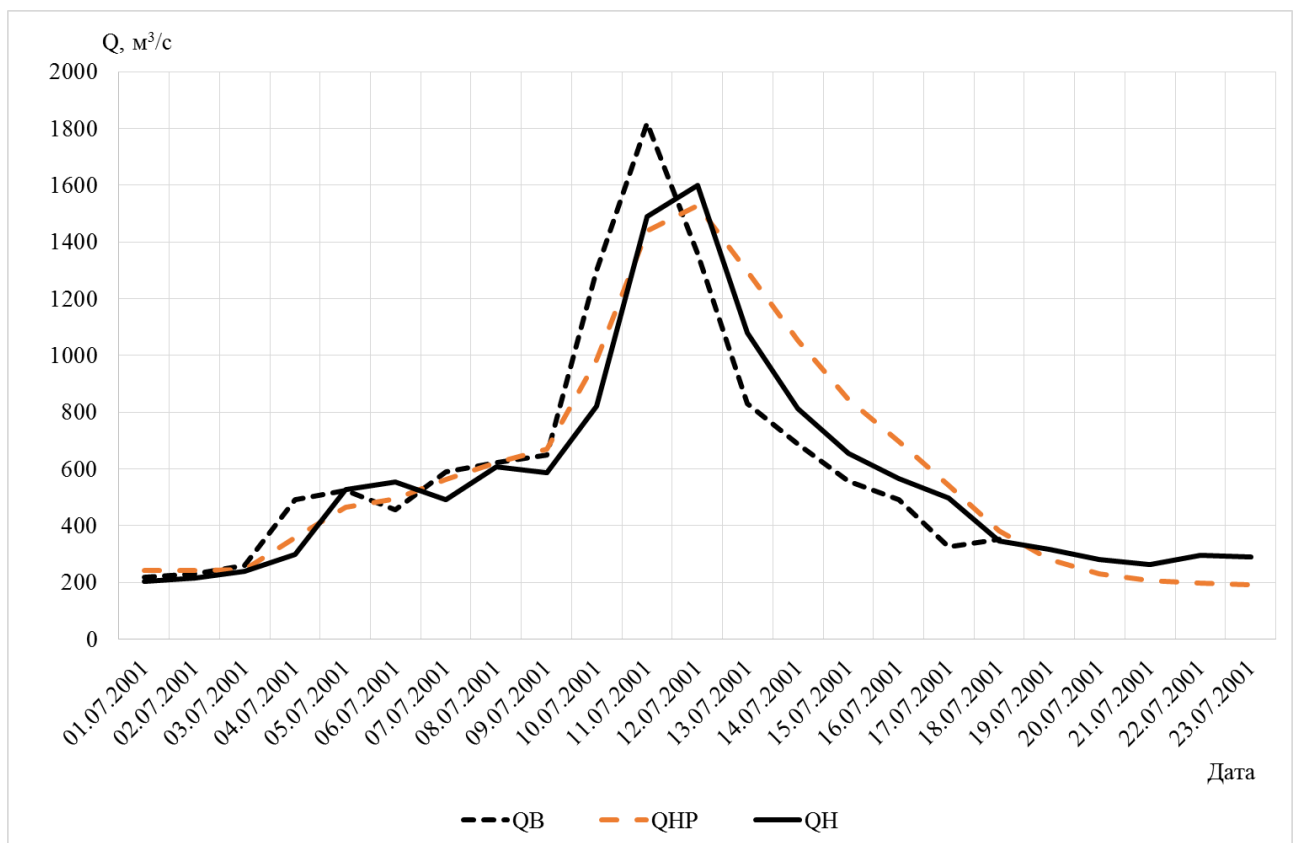


Рисунок Б.1 - Збіжність спостережних і розрахункового гідрографів дощового паводку р.Дністер – с.Грушка у 2001 році

$\sigma=$	381	$\text{м}^3/\text{с}$
$S=$	104	$\text{м}^3/\text{с}$
$S/\sigma=$	0,27	
$(1-S/\sigma)=$	0,73	
$k\sigma=$	1,11	
$W_{HP}/W_H=$	1,01	
$(W_{HP}*k\sigma)/W_H=$	1,12	

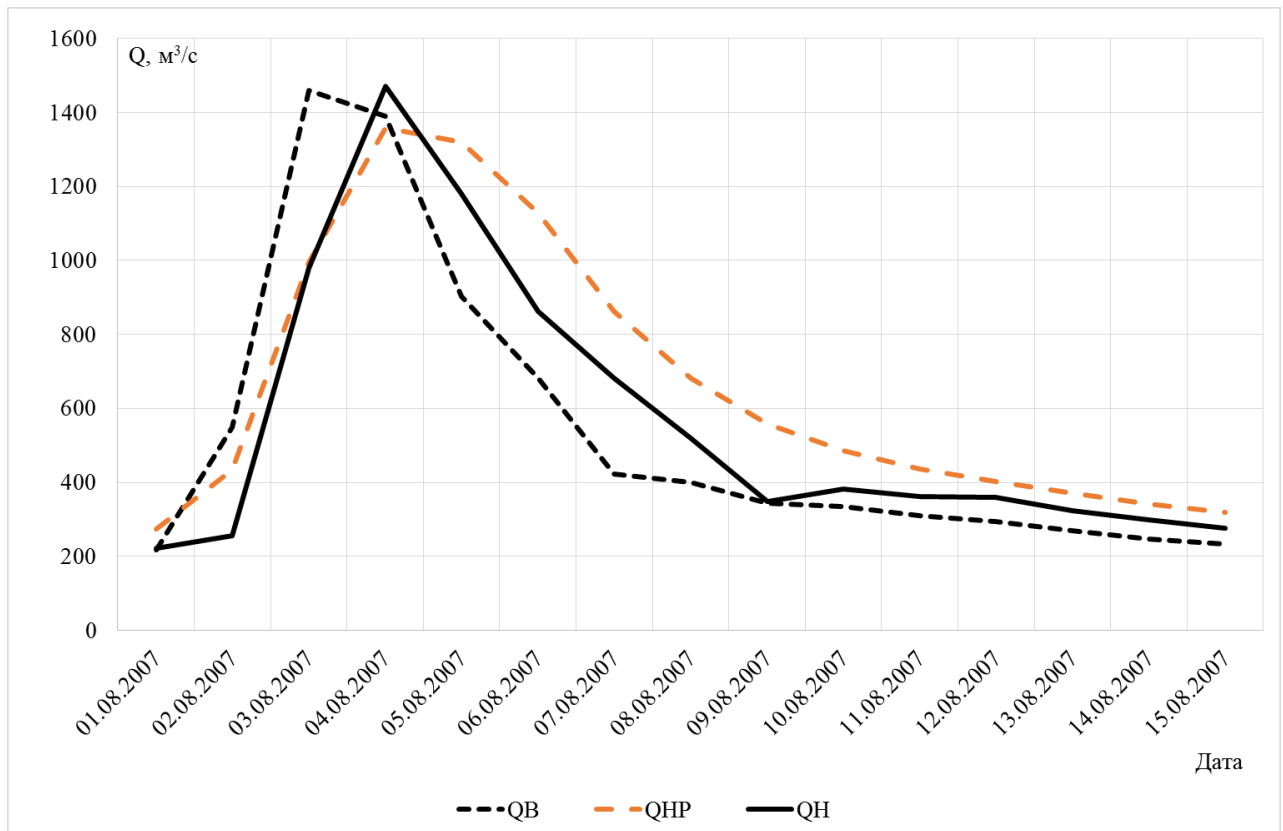


Рисунок Б.2 - Збіжність спостережних і розрахункового гідрографів дощового паводку р.Дністер – с.Грушка у 2007 році

$\sigma=$	354	$\text{м}^3/\text{с}$
-----------	-----	-----------------------

$S=$	160	$\text{M}^3/\text{c}$
$S/\sigma=$	0,45	
$(1-S/\sigma)=$	0,55	
$k\sigma=$	1,25	
$W_{Hp}/W_H=$	0,80	
$(W_{Hp}*k\sigma)/W_H=$	1,00	

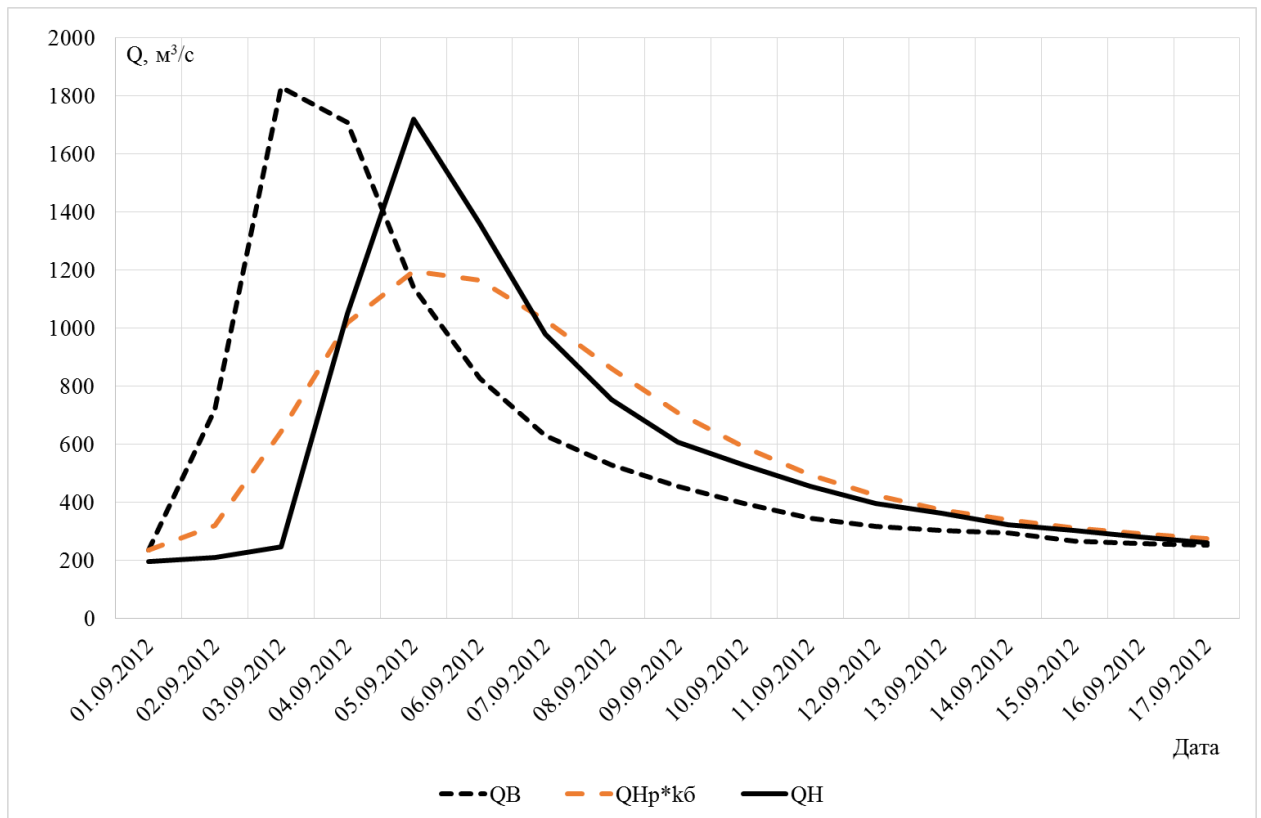


Рисунок Б.3 - Збіжність спостережних і розрахункового гідрографів дощового паводку р.Дністер – с.Грушка у 2012 році

$\sigma=$	433	$\text{M}^3/\text{c}$
$S=$	165	$\text{M}^3/\text{c}$

$S/\sigma=$	0,38
$(1-S/\sigma)=$	0,62
$k\sigma=$	1,00
$W_{HP}/W_H=$	1,15
$(W_{HP}*k\sigma)/W_H=$	1,15

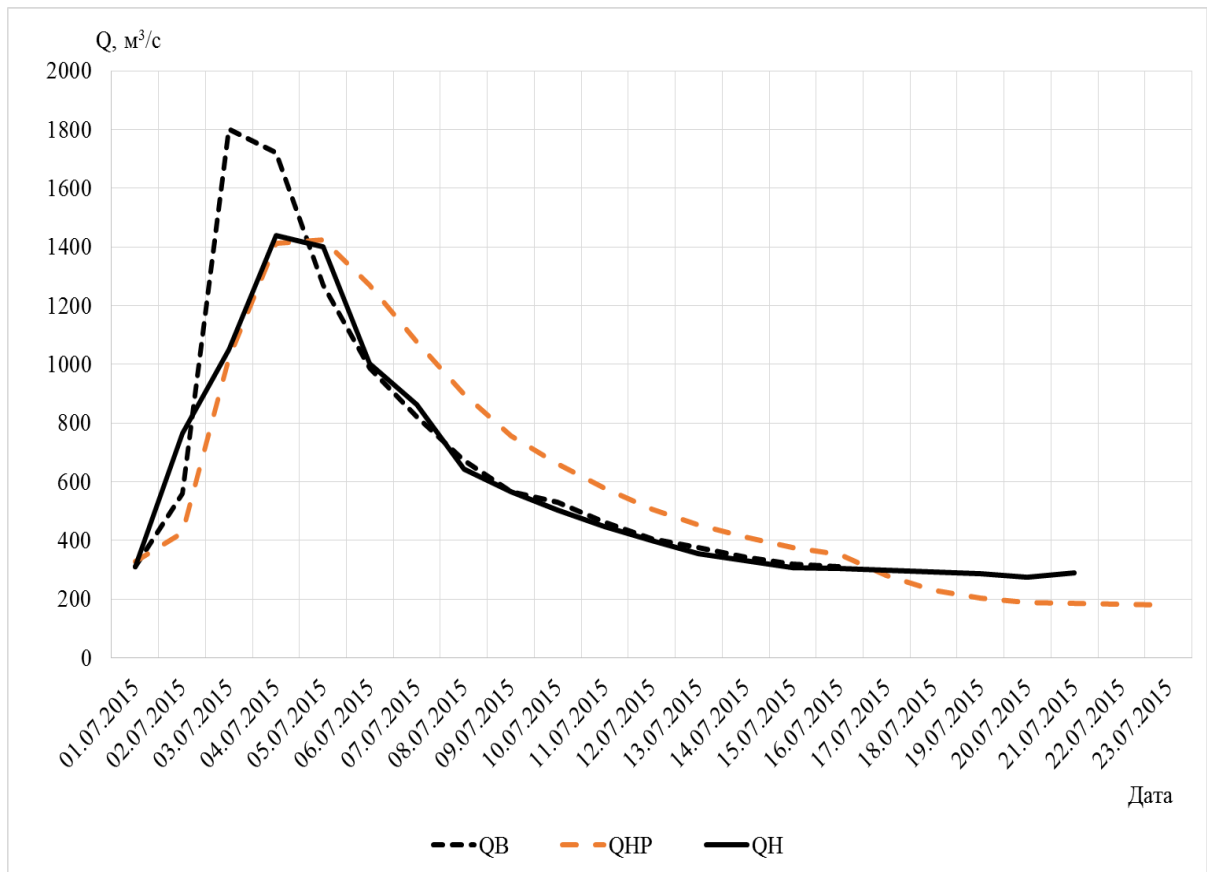


Рисунок Б.3 - Збіжність спостережних і розрахункового гідрографів дощового паводку р.Дністер – с.Грушка у 2015 році

$$\sigma = 394 \text{ м}^3/\text{с}$$

$S=$	148	$\text{M}^3/\text{c}$
$S/\sigma=$	0,38	
$(1-S/\sigma)=$	0,62	
$k\sigma=$	1,06	
$W_{\text{HP}}/W_{\text{H}}=$	1,04	
$(W_{\text{HP}}*k\sigma)/W_{\text{H}}=$	1,10	