

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та природокористування

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Панасенко Анна Володимирівна

УДК 627.51:556.166

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПРОПУСКУ ПАВОДКОВИХ
ВОД ЧЕРЕЗ СЕРЕДНЬОНАПІРНІ ГІДРОВУЗЛИ З УРАХУВАННЯМ
ХАРАКТЕРИСТИК ПАВОДКОВОЇ ХВИЛІ

05.23.16 – гідравліка та інженерна гідрологія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.В. Панасенко

Науковий керівник Рябенко Олександр Антонович д. т. н., професор

АНОТАЦІЯ

Панасенко А.В. Удосконалення методів розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли з урахуванням характеристик паводкової хвилі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.16 – гідравліка та інженерна гідрологія. – Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, 2021.

Економічні збитки від повеней та паводків набули катастрофічних значень через зростання кількості та масштабів їх розповсюдження. Існуючі методики пропуску паводків та завчасної підготовки водосховищ до прийняття паводкових вод є неефективними та потребують удосконалення. Тому актуальною була задача розробки методики, яка б усунула зазначені недоліки.

У дисертаційній роботі автором запропоновано методику розрахунків пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища, яка дає можливість зрізання максимальних витрат через гідровузол шляхом акумулювання паводкових вод у водосховищі.

У програмному комплексі MIKE 11 (Датський інститут, Данія) створено гідродинамічну модель руху паводкових вод на досліджуваній ділянці річки від гідрологічного поста до гідровузла, яка дає змогу визначити рівні води та витрат, що надходять в водосховище у будь-який момент часу у вигляді кривих вільної поверхні при пропуску паводків різної забезпеченості.

Методика розроблена з метою ефективного пропуску паводкових вод та зрізання максимальних витрат у нижній б'єф гідровузла.

Методами і проблемою розрахунків неусталеного руху води у відкритих руслах, займалися Барре де Сен-Венан, Ж.В. Буссінеск, Е.М. Прейссман, О.Ф. Васільєв, Д.Ж. Гунаратман, Ф.Е. Перкінс, Р.Ю. Шеннон, М.С. Грушевський, Г. В. Железняков, В. П. Рогунович, Ж.А. Кюнж, Ф.М. Холлі, А. Вервет, Д.В. Штеренлихт, В.А. Прокоф'єв, В.В. Беліков, А.Н. Мілітєв, А.М. Прудовський, В.Б. Радіонов, О.А. Рябенко, М.М. Хлапук, О.І. Клапоущак,

Л.М. Заміховський, Р. Хоса, Р. Холдар та багато інших, як вітчизняних і закордонних вчених, які працювали над створенням та удосконаленням методів та методик розрахунків, використовуючи результати модельних досліджень намагаючись з певним наближенням числено розв'язати рівняння Сен-Венана.

В дисертаційній роботі проведено детальний аналіз існуючих методик прогнозування паводків. Методики прогнозування паводків на основі гідрологічних моделей різної складності мають як сильні сторони, так і обмеження, які не дають можливість отримати достовірні результати. Як свідчать результати досліджень [1, 2], є тенденція розгляду питань, присвячених удосконаленню існуючих методик прогнозування паводків, на основі гідрологічних моделей з використанням змінних і постійних вихідних даних.

Розглядаючи потенціал процесу удосконалення існуючих методик прогнозування паводків на основі гідрологічних моделей, важливо відзначити, що обговорення зазвичай досягають кульмінації з концепцією невизначеностей. Більшість досліджень, що відносяться до моделювання паводків, повідомляє про наявність невизначеностей в існуючих моделях паводків [3].

Аналіз невизначеності включає оцінку повноти вихідних даних моделі і їх вплив на результати розрахунку [4]. Аналіз чутливості допомагає зрозуміти характеристики моделі паводків за різними параметрами, наприклад топографії та коефіцієнту тертя Меннінга [5].

За останнє десятиліття спроби удосконалення існуючих методик прогнозування паводків на основі гідрологічних моделей широко обговорювалися в літературі з моделювання паводків [6], але все ще стверджується, що існуючі моделі паводків не досягли прийнятної межі калібрування [7]. Це пов'язано з обмеженою доступністю відповідних вихідних даних, які мають вирішальне значення при моделюванні паводків.

Для моделювання паводкових вод у світі існує багато програмних комплексів, одним з яких є MIKE 11 [8]. Зазначений програмний комплекс дозволяє моделювати паводки та повені, розробляти шляхи евакуації, здійснювати розрахунки прориву гребель. Існує велика кількість методик

численого вирішення рівняння нерозривності потоку в розгалужених руслах, деякі з яких описані [9]. Але необхідно враховувати той факт, що кожна річка має свої гідрологічні характеристики і особливості, тому існуючі методики потребують пристосування до відповідних умов або застосування досліджень на річках-аналогах з подібною гідрологічною ситуацією [10]. Також важливим фактором є зміна клімату, і це необхідно також враховувати у розрахунках [11].

Отже, з огляду на гостру необхідність удосконалення існуючих методик прогнозування паводків на основі гідрологічних моделей, логічною альтернативою є розробка спеціальної моделі з неусталеним рухом паводкової хвилі по водосховищу за допомогою програми MIKE 11. В основі методики є неявно краєво-різницева схема потоку, що базується на двовимірному рівнянні Сен-Венана. У розрахунковій схемі використовуються прогнози приточності води у водосховищі на підставі фактичних даних гідрологічних постів, які розташовані вище водосховища. Такий підхід дозволить звести до мінімуму кількість невизначених вихідних даних і зрозуміти чутливість моделі до різних характеристик для адаптації моделі до конкретних гідрологічних особливостей річки.

Необхідно зробити акцент на те, що сьогодні контроль за рівнем паводкових вод та удосконалення методик прогнозування не можливий без застосування математичного моделювання.

Наукову новизну дисертації визначають положення, отримані як результат власних досліджень Панасенко А.В.:

- вперше враховано вплив характеристик паводкової хвилі на розрахункове значення максимальних скидних витрат, завдяки чому зменшено обсяги максимальних скидних витрат через середньонапірний гідровузол (на прикладі Дністровського гідровузла), а також визначено час добігання паводкової хвилі до створу ГЕС;

- удосконалено «Методику розрахунку пропуску паводків через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі

прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища»;

– набуло подальшого розвитку застосування програмного комплексу MIKE 11 для створення математичної моделі руху паводкових вод на досліджуваній ділянці річки Дністер, що базується на рішенні повних нелінійних рівнянь Сен-Венана для потоків у відкритих розгалужених руслах для визначення руху паводкової хвилі по Дністровському водосховищу;

– здійснено верифікацію створеної математичної моделі з використанням даних реального паводку, який відбувся у липні 2008 року.

Створена гідродинамічна модель в подальшому слугуватиме інструментом для здійснення відповідних розрахунків та пропуску паводків через Дністровський гідровузол різної забезпеченості за рахунок зменшення максимальних витрат через Дністровський гідровузол.

Основні положення використаних теоретичних та практичних досліджень пройшли належну апробацію та доповідались на таких конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція “ПАТ Укргідропроєкт”, м. Харків, 2013 р., Конкурс молодих спеціалістів в ЗАП “Сибірський енергетичний науково-технічний центр”, РФ, м. Новосибірськ, 2013 р., Студентська науково-технічна конференція секції “Гідроенергетики та гідравлічних машин НУВГП”, 2014 р., 14-та Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону», м. Львів, 2015 р., VII Міжнародна науково-технічна конференція гідроенергетиків «Стійкий розвиток гідроенергетики, як основа мобільності і маневреності ОЕС України», Київ, 2015 р., Водний форум. «Актуальні проблеми використання та охорони водних ресурсів і перспективи розвитку водного господарства», НУВГП, Рівне – 2015 р., Научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии» ВНИИГ, г. Санкт-Петербург – 2015 г., Науково-технічна конференція на кафедрі ГЕ, ТЕ та ГМ, Рівне – 2016 р., 15-та Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону», м. Львів, 2016 р., X-та Міжнародна науково-практична конференція «Нетрадиційні поновлювальні джерела енергії

як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні», м. Львів, 2019 р., VII науково-практична конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку, аналіз і керування електроенергетичними системами. Новітні досягнення у проведенні тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу», с.м.т. Славсько Львівської області, 2020 р., Позачергове засідання науково-технічної ради (НТР) ПрАТ «Укргідропроєкт» від 24 лютого 2021 р., м. Харків.

Ключові слова: коливання рівнів води, неусталений режим, прогноз, витрата води, водосховище, неявна краєво-різницева схема потоку, МІКЕ 11.

Список опублікованих праць

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Рябенко О. А., Татарінцев О.В., Семенуха А.В. Гідравлічний режим в нижньому б'єфі Каховської ГЕС після будівництва ГЕС–2 при добовому регулюванні потужності. *Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць*. Рівне, 2015. Випуск 3(71). С. 221 – 226.

2. Рябенко А.А., Татарінцев А.В., Семенуха А.В. Пропуск паводков через Дністровський гідроузел на основі прогнозів приточності с учетом неустановившегося движения паводочной волны по водохранилищу. *Гідроенергетика України*. Київ, 2016. №1 – 2. С. 62 – 66.

3. Панасенко А.В. Прогнозування гідроресурсів та планування водноенергетичних режимів каскадів ГЕС та ГАЕС з врахуванням кліматичних змін. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Том 31(70). № 6 Частина 2, С. 178 – 181.

4. Панасенко А.В., Сунічук С.В. Пропуск паводків нормативної забезпеченості через Дністровський гідровузел на основі прогнозів приточності. *Вісник НУВГП*. Рівне, 2020. Випуск 4(92). С. 3 – 11.

5. Панасенко А.В. Удосконалення методів розрахунків пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли з урахуванням характеристик паводкової хвилі. *Електронне моделювання, Національна академія наук України, Інститут*

проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. Київ, 2021. Том 43(2). С. 98 – 108.

Статті у наукових фахових виданнях України, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection або Scopus:

6. Olefir D.O., Panasenko A. V. Methods of forecasting and planning of water resources and redistribution of runoff costs on the example of passing the flood. Методика прогнозування та планування водних ресурсів та перерозподіл стокових витрат. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. No 2(110) (2021): Hydropower. p. 6 – 12. ISSN1729-3774.

Scopus <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228561>

Публікації у матеріалах науково-технічних конференцій:

7. Семенуха А.В. Гидравлический режим в нижнем бьефе Каховской ГЭС после строительства ГЭС–2 при суточном регулировании мощности. Доклады и тезисы. Девятая научно-техническая конференция «Гидроэнергетика Новые разработки и технологии» (22 – 24 октября 2015 г., г. Санкт-Петербург). С. 76.

8. Семенуха А.В. Гідравлічний режим в нижньому б'єфі Каховської ГЕС після розширення (створення ГЕС–2) при добовому регулюванні потужності. 14-а міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону», Проблеми охорони та раціонального використання. Львів, 2015. С. 121–128.

9. Семенуха А.В. Пропуск паводков через Днестровский гидроузел на основе прогнозов приточности с учетом неустановившегося движения паводочной волны по водохранилищу, Гидроэнергетика Новые разработки и технологии, Издательство АО «ВНИИГ» им. Б.Е.Веденеева, г. Санкт-Петербург, 2016 г., С. 128–133.

10. Панасенко А.В. Пропуск паводків нормативної забезпеченості через Дністровський гідровузел на основі прогнозів приливності. 15-а міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського

регіону», Проблеми охорони та раціонального використання. Львів, 2016. С.196–199.

ABSTRACT

Panasenko A.V. Improvement of methods for calculating the flow of flood waters through medium-pressure hydraulic units, taking into account the characteristics of the flood wave. – On the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.23.16 – hydraulics and engineering hydrology. – The national university of water and environmental engineering (NUWEE), Rivne, 2021.

Economic losses from floods and floods have become catastrophic due to the growing number and scale of their spread. Existing methods of flood prevention and early preparation of reservoirs for flood acceptance are inefficient and need to be improved. Therefore, the task of developing a methodology that would eliminate these shortcomings was urgent.

In the dissertation the author proposes a method of calculating the flow of flood water through medium pressure hydropower plants based on water inflow forecasts taking into account the characteristics of the flood wave and the reservoir filling regime, which allows cutting the maximum flow through the reservoir by accumulating flood water in the reservoir.

The software complex MIKE 11 (Danish Institute, Denmark) created a hydrodynamic model of flood water movement in the studied section of the river from the hydrological station to the hydroelectric power station, which allows to determine water levels and costs entering the reservoir at any time in the form of free curves. surfaces when passing floods of different security.

The technique is designed to effectively pass flood waters and cut the maximum costs in the lower reaches of the hydro.

Methods and the problem of calculations of unsteady movement of water in open channels, were engaged: Barre de Saint-Venant, J.W. Bussinesk, E.M. Preissman, O.F. Vasiliev, D.Zh. Gunaratman, F.E. Perkins, R.Yu. Shannon, M.S. Hrushevsky, G.V. Zheleznyakov, V.P. Rogunovich, D.V. Sternlicht, W.A. Prokofiev, V.V. Belikov, A.N.

Militev, A.M. Prudovsky, V.B. Radionov, O.A. Ryabenko, M.M. Khlapuk, O.I. Klapoushchak, L.M. Zamikhovsky, P. Khosa, R. Kholdar and many others, both domestic and foreign scientists who worked on the creation and improvement of methods and calculation methods, using the results of model studies trying to numerically solve the equation of Saint-Venant.

In the dissertation work the detailed analysis of existing methods of flood forecasting is carried out. Flood forecasting techniques based on hydrological models of varying complexity have both strengths and limitations that do not allow to obtain reliable results. According to the results of research [1, 2], there is a tendency to consider issues related to the improvement of existing methods of flood forecasting, based on hydrological models using variable and constant initial data.

Considering the potential of the process of improving existing flood forecasting techniques based on hydrological models, it is important to note that discussions usually culminate with the concept of uncertainties. Most studies related to flood modeling report uncertainties in existing flood models [3].

Uncertainty analysis includes an assessment of the completeness of the initial model data and their impact on the calculation results [4]. Sensitivity analysis helps to understand the characteristics of the flood model by various parameters, such as topography and Manning's coefficient of friction [5].

Over the last decade, attempts to improve existing flood forecasting techniques based on hydrological models have been widely discussed in the flood modeling literature [6], but it is still argued that existing flood models have not reached an acceptable calibration limit [7]. This is due to the limited availability of relevant source data, which are crucial in modeling floods.

There are many software packages in the world for modeling flood waters, one of which is MIKE 11 [8]. The specified software complex allows to model floods and floods, to develop ways of evacuation, to carry out calculations of break of dams. There are a large number of methods for numerically solving the equation of flow continuity in branched channels, some of which are described [9]. But it is necessary to take into account the fact that each river has its own hydrological characteristics and features,

so the existing methods require adaptation to appropriate conditions or the use of research on similar rivers with a similar hydrological situation [10]. Climate change is also an important factor, and this should also be taken into account in the calculations [11].

Therefore, given the urgent need to improve existing methods of flood forecasting based on hydrological models, a logical alternative is to develop a special model with unsteady movement of the flood wave through the reservoir using the program MIKE 11. The method is based on implicit marginal flow pattern based on two-dimensional equation of Saint-Venant. The calculation scheme uses forecasts of water inflow in the reservoir on the basis of actual data of hydrological posts located above the reservoir. This approach will minimize the amount of uncertain source data and understand the sensitivity of the model to different characteristics to adapt the model to specific hydrological features of the river.

It is necessary to emphasize that today control over the level of flood waters and improvement of forecasting methods is not possible without the use of mathematical modeling.

The scientific novelty of the dissertation is determined by the provisions obtained as a result of own research Panasenko A.V.:

- for the first time the influence of flood wave characteristics on the calculated value of maximum discharge costs was taken into account, due to which the volumes of maximum discharge costs through the medium pressure hydro unit were reduced (on the example of the Dniester hydro unit);

- improved "Methodology for calculating the flow of floods through medium-pressure hydro units (on the example of the Dniester hydro unit) on the basis of water inflow forecasts taking into account the characteristics of the flood wave and the reservoir filling regime";

- further application of the MIKE 11 software package to create a mathematical model of flood water movement on the studied section of the Dniester River, based on solving complete nonlinear Saint-Venant equations for flows in open branched channels to determine the flow of flood waves on the Dniester reservoir;

– the created mathematical model was verified using the data of the real flood, which took place in July 2008.

The created hydrodynamic model will further serve as a tool for the implementation of appropriate calculations and the passage of floods through the Dniester hydroelectric power station of different security by reducing the maximum costs through the Dniester hydroelectric power plant.

The main provisions of the used theoretical and practical research were properly tested and reported at the following conferences: International Scientific and Technical Conference "PJSC Ukrhydroproject", Kharkiv, 2013, Competition of young professionals in CJSC "Siberian Energy Scientific and Technical Center", Novosibirsk, 2013, Student Scientific and Technical Conference of the Section "Hydropower and Hydraulic Machines NUWEE", 2014, 14th International Scientific and Technical Conference "Natural Water Resources of the Carpathian Region", Lviv, 2015, VII International Scientific and Technical Conference of Hydropower "Sustainable Development of Hydropower as a Basis for Mobility and Maneuverability of the ECO of Ukraine", Kyiv, 2015, Water Forum. "Actual problems of use and protection of water resources and prospects for the development of water management", NUWEE, Rivne – 2015, Scientific and Technical Conference "Hydropower. New developments and technologies "VNIIG, St. Petersburg – 2015, Scientific and Technical Conference at the Department of GE, TE and GM, Rivne – 2016, 15th International Scientific and Technical Conference "Natural Water Resources of the Carpathian Region", Lviv, 2016, X-th International Scientific and Practical Conference "Unconventional Renewable Energy Sources as an Alternative to Primary Energy Sources in the Region", Lviv, 2019, VII Scientific and Practical Conference "Current State and Prospects for Development, analysis and control of power systems. The latest achievements in the training of operational and dispatching staff", s.m.t. Slavsko, Lviv region, 2020, Extraordinary meeting of the Scientific and Technical Council (SCC) of PJSC "Ukrhydroproekt" dated February 24, 2021, Kharkiv.

Keywords: water level fluctuations, unstable regime, forecast, water flow, reservoir, implicit marginal flow difference scheme, MIKE 11.

List of published works

Articles in scientific professional publications of Ukraine:

1. Ryabenko O.A., Tatarintsev O.V., Semenukha A.V. Hydraulic regime in the lower reaches of the Kakhovka HPP after the construction of HPP–2 with daily power regulation. Bulletin of NUWEE. Technical sciences: coll. Science. wash. Rivne, 2015. Issue 3 (71). Pp. 221–226.

2. Ryabenko A.A., Tatarintsev A.V., Semenukha A.V. Passing of floods through the Dniester hydroelectric power station on the basis of inflow forecasts taking into account the unsteady movement of a flood wave on a reservoir. Hydropower of Ukraine. Kyiv, 2016. №1–2. P. 62–66.

3. Panasenko A.V. Forecasting of hydro resources and planning of water power regimes of cascades of HPPs and PSPs taking into account climate change. Scientific notes of Tavriya National University named after VI Vernadsky. Series: Technical Sciences. 2020. Volume 31 (70). № 6 Part 2, pp. 178–181.

4. Panasenko A.V., Sunichuk S.V. Passing of floods of regulatory provision through the Dniester hydroelectric power station on the basis of inflow forecasts. Bulletin of NUVGP. Rivne, 2020. Issue 4 (92). Pp. 3–11.

5. Panasenko A.V. Improvement of methods for calculating the flow of flood waters through medium-pressure hydraulic units, taking into account the characteristics of the flood wave. Electrical modeling, National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Modeling Problems in Energy. G.E. Pukhov. Kyiv, 2021. Volume 43 (2). Pp. 98–108.

Articles in scientific professional publications of Ukraine, indexed in Web of Science Core Collection or Scopus databases:

6. Olefir D.O., Panasenko A.V. Methods of forecasting and planning of water resources and redistribution of runoff costs on the example of passing the flood. Methods of forecasting and planning of water resources and redistribution of stock costs. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. No. 2 (110) (2021):

Hydropower. p. 6–12. ISSN 1729-3774. Scopus <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228561>

Publications in materials of scientific and technical conferences:

7. Semenukha A.V. Hydraulic regime in the lower reaches of the Kakhovka HPP after the construction of HPP–2 with daily power regulation. Reports and theses. Ninth Scientific and Technical Conference "Hydropower New Developments and Technologies" (October 22–24, 2015, St. Petersburg). S. 76.

8. Semenukha A.V. Hydraulic regime in the lower reaches of the Kakhovka HPP after expansion (creation of HPP–2) with daily power regulation. 14th International Scientific and Practical Conference "Natural Water Resources of the Carpathian Region", Problems of protection and rational use. Lviv, 2015. S. 121–128.

9. Semenukha A.V. Passage of floods through the Dniester hydroelectric power station on the basis of inflow forecasts taking into account the unsteady movement of a flood wave on a reservoir, Hydropower New developments and technologies, Publishing house of JSC VNIIG it. B.E. Vedeneeva, St. Petersburg, 2016, pp. 128–133.

10. Panasenko A.V. Passage of floods of regulatory provision through the Dniester hydroelectric power station on the basis of tidal forecasts. 15th International Scientific and Practical Conference "Natural Water Resources of the Carpathian Region", Problems of protection and rational use. Lviv, 2016. P.196–199.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	17
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАВОДКІВ.....	28
1.1. Умови формування паводків.....	28
1.2. Історична довідка проходження визначних паводків на території України, їх наслідки.....	30
1.3. Сучасний стан дослідження проблеми розрахунку неусталеного руху води в річках.....	33
1.4. Аналіз методів і систем контролю та прогнозування рівня паводкових вод.....	36
1.5. Висновки та задачі дослідження.....	39
РОЗДІЛ 2. МЕТОД РОЗРАХУНКІВ НЕУСТАЛЕНОГО РУХУ ВОДИ НА ОСНОВІ РІВНЯННЯ СЕН-ВЕНАНА ПРИВЕДЕНОГО ДО КОНКРЕТНОЇ ЗАДАЧІ, В РЕЗУЛЬТАТІ АНАЛІЗУ ГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІЧКИ ДНІСТЕР.....	41
2.1. Фізико-математичні основи руху води в річці Дністер.....	42
2.2. Рівняння Сен-Венана приведені до конкретної задачі в результаті аналізу гідравлічних характеристик річки Дністер.....	45
2.3. Витратні характеристики і коефіцієнти шорсткості русла.....	56
2.4. Висновки.....	59
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ ПРОПУСКУ ПАВОДКУ ЧЕРЕЗ ДНІСТРОВСЬКИЙ ГІДРОВУЗОЛ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ МІКЕ 11 В ОСНОВІ НЕЯВНО КРАЄВО- РІЗНИЦЕВОЇ СХЕМИ ПОТОКУ, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА РІВНЯННІ СЕН- ВЕНАНА.....	60
3.1. Рівняння Сен-Венана у дискретній формі і його вирішення за допомогою схеми Еббота-Іонеску.....	60

3.2. Алгоритм вирішення рівнянь методом «подвійної прогонки».....	66
3.3. Висновки.....	70

РОЗДІЛ 4. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НЕУСТАЛЕНОГО РУХУ ПАВОДКОВОЇ ХВИЛІ ПО ДНІСТРОВСЬКОМУ ВОДОСХОВИЩУ. ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ.....	71
---	----

4.1. Характеристика річки Дністер.....	71
4.1.1. Гідрологічна характеристика.....	71
4.1.2. Гідрографічна характеристика.....	74
4.1.3. Стік за період спостережень.....	76
4.1.4. Річний стік, його мінливість та внутрішній розподіл.....	81
4.1.5. Максимальний стік р. Дністер, розрахункові гідрографи.....	93
4.2. Характеристики та режими роботи водосховищ Дністровського каскаду.....	114
4.3. Топографічні дані.....	122
4.4. Початкові та граничні умови.....	130
4.5. Боковий приток.....	133
4.6. Пропускна спроможність Дністровської ГЕС.....	133
4.7. Калібрування моделі.....	137
4.8. Результати розрахунку пропуску фактичного паводку 2008 року через Дністровську ГЕС (верифікація моделі).....	137
4.9. Висновки.....	141

РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНКИ ПРОПУСКУ ПАВОДКОВИХ ВОД ЧЕРЕЗ СЕРЕДНЬОНАПІРНІ ГІДРОВУЗЛИ (НА ПРИКЛАДІ ДНІСТРОВСЬКОГО ГІДРОВУЗЛА) УДОСКОНАЛЕНОЮ МЕТОДИКОЮ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗІВ ПРИТОЧНОСТІ ВОДИ З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ПАВОДКОВОЇ ХВИЛІ ТА РЕЖИМУ НАПОВНЕННЯ ВОДОСХОВИЩ.....	142
--	-----

5.1. Регулювання паводків та весняних водопіль по прийнятій схемі в затвердженому проекті Дністровського гідровузла.....	142
--	-----

5.2. Методика розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища.....	147
5.3. Висновки.....	160
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	161
ЛІТЕРАТУРА.....	164
ДОДАТКИ.....	173

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Басейн водозбірний – частина земної поверхні і товщі ґрунтів, з яких відбувається стік води у водотік або водойму;

Б'єф – ділянка річки, розташована вище або нижче від водопідпірної споруди (греблі);

Використання води – процес вилучення води для використання у виробництві з метою отримання продукції та для господарсько-питних потреб населення, а також без її вилучення для потреб гідроенергетики, рибництва, водного, повітряного транспорту та інших потреб;

Витрати води – середні витрати води у кубічних метрах за секунду;

Водний об'єкт – природний або створений штучно елемент довкілля, в якому зосереджуються води (море, річка, озеро, водосховище, ставок, канал, водоносний горизонт);

Водні ресурси – обсяги поверхневих, підземних і морських вод відповідної території;

Водність – характеристика величини річкового стоку за певний проміжок часу відносно його середньої багаторічної величини;

Водогосподарська ділянка – частина річкового басейну, для якої розробляються водогосподарські баланси, встановлюються ліміти забору води із водного об'єкта та інші параметри використання водного об'єкта (водокористування);

Водогосподарські системи – комплекс пов'язаних між собою водних об'єктів та гідротехнічних споруд, призначених для управління водними ресурсами;

Водозабір – споруда або пристрій для забору води з водного об'єкта;

Водойма – безстічний або із сповільненим стоком поверхневий водний об'єкт;

Водокористування – використання вод (водних об'єктів) для задоволення потреб населення, промисловості, сільського господарства, транспорту та інших

галузей економіки, включно із правом на забір води, скидання стічних вод та інші види використання вод (водних об'єктів);

Водосховище – штучна водойма місткістю більше 1 млн. кубічних метрів, збудована для створення запасу води та регулювання її стоку;

Водосховище комплексного призначення – водосховище, яке відповідно до паспорта використовується для двох і більше цілей (крім рекреаційних);

Гідротехнічні споруди (ГТС) – це об'єкти, що створюються з метою використання кінетичної енергії води гідроелектростанції (ГЕС), охолодження технологічних процесів, меліорації, захисту прибережних територій (дамби), забору води для водопостачання й зрошення, захисту риби, регуляції рівня води, забезпечення діяльності морських і річкових портів, для судноплавства (шлюзи);

Діапазон потужностей – різниця між максимально та мінімально можливим навантаженням енергетичного обладнання;

Добове регулювання – збільшення витрат води через гідровузол у години максимального навантаження енергосистеми та зменшення або припинення їх у години мінімального навантаження енергосистеми протягом доби;

Добові коливання рівня води – різниця між максимальним та мінімальним рівнем води від 0 до 24 год доби;

Забір води – вилучення води з водного об'єкта для використання за допомогою технічних пристроїв або без них;

Заплавні землі – прибережна територія, що може бути затоплена чи підтоплена під час повені (паводка);

Категорія водного об'єкта – класифікація поверхневих водних об'єктів за категорією господарсько-питного, культурно-побутового і рибогосподарського водокористування;

Маловоддя – період (фаза) гідрологічного режиму водного об'єкта, при якому спостерігається зменшення його водності, внаслідок чого погіршуються умови забезпечення потреб у водних ресурсах;

Межень (меженний період) – період річного циклу, протягом якого спостерігається низька водність;

Нерестовий період – період відтворення (розмноження) риби;

Неусталений (нестационарний) рух – рух рідини, коли тиск і швидкість в даній точці змінюються з часом;

Нормальний підпірний рівень (НПР) – найвищий підпірний рівень, що може підтримуватися у нормальних умовах експлуатації водосховищ.

Паводок – значне підвищення водності річки в межах річного циклу, що виникає нерегулярно; утворюється під час сильних дощів чи під час відлиги. На відміну від повені, паводки виникають нерегулярно. Значний паводок може викликати повідь.

Прогноз (грец. prognosis – «знання наперед») – спеціальне наукове дослідження конкретних перспектив розвитку якого-небудь явища. У логіці під гіпотезою розуміють припущення, яке пояснює спостережуване явище, воно потребує перевірки на досліді та теоретичного обґрунтування.

Піки навантажень енергосистеми – максимальні добові навантаження енергосистеми в години максимального споживання електроенергії.

Потік рідини – це частина нерозривної рухомої рідини, обмеженої твердими стінками (інколи повітряним або рідинним середовищем), які утворюють русло потоку.

Річковий басейн (водозбір) – частина земної поверхні і товщі ґрунтів, стік води з якої послідовно через пов'язані водойми і водотоки здійснюється в море, лиман або озеро;

Рівень мертвого об'єму (РМО) – гранично можливий рівень спрацювання водосховища.

Рівень навігаційного спрацювання (РНС) – граничнодопустимий проектний рівень спрацювання водосховища у період навігації.

Усталений (стаціонарний) рух - рух рідини, якщо параметри потоку (тиск, швидкість) в даній точці не змінюються з часом.

Форсований підпірний рівень водосховища (ФПР) – найвищий проектний підпірний рівень водоймища, який допускається при пропуску паводків високої забезпеченості (зазвичай вище 1 % забезпеченості).

ВСТУП

Актуальність теми. Зростання останніми роками кількості паводків, що підтоплювали значні по площі прилеглі території вздовж річок у різних куточках світу, та призводили до значних економічних втрат, викликає занепокоєння та змушує світову спільноту замислитися над створенням дієвих механізмів для прогнозування та регулювання стоку при проходженні паводків та повеней.

Аномальні за своїми обсягами опади, їх періодичність виникнення призводять до формування або занадто великого, або занадто маленького обсягу водних ресурсів, в результаті чого спостерігаються, відповідно, або повені або посухи. Загалом, зміна кліматичних показників у світі впливає як на навколишнє середовище, так і на соціально-економічну ситуацію.

Негативні наслідки від повеней і паводків можливі на 27% території України, де проживає майже третина населення країни. Найбільшої шкоди від них зазнають гірські та передгірські райони Карпат. Басейн Дністра є гарним прикладом східноєвропейської транскордонної річки, для якої існує нагальна необхідність розробки системи прогнозування повеней, регулювання стоку та оповіщення про них населення, що розташовані на протязі всього басейну.

Тільки за останні 20 років на території України значні паводки, що призвели до виникнення надзвичайних ситуацій, спостерігалися у 1995, 1998, 2001, 2008, 2010, 2020 роках. Так, середньорічні збитки від паводків у 1995 – 1998 роках становили більше 900 млн. гривень, 1999 – 2007 роках – понад 1,5 млрд. гривень, у 2008 – 2010 роках – близько 6 млрд. гривень, у 2020 році – 1,5 млрд. гривень.

Враховуючи європейський досвід, сьогодні в Україні здійснюється поступовий перехід від пасивного протипаводкового захисту до активної фази, в основі якої реалізується будівництво протипаводкових об'ємів та водосховищ у складі ГЕС. Це дасть можливість знизити рівні високих паводків до рівня паводків 10%-ї забезпеченості, та здійснювати їх пропуск у межах русла річок без нерегульованого затоплення прилеглих територій.

Рівень впливу гідроенергетики на регулювання паводків досить високий. Завдяки створенню Дністровського водосховища з'явилась можливість

зменшення збитків від затоплень прилеглих до річки Дністер територій шляхом регулювання паводків. Для цього у водосховищі передбачено спеціальний протипаводковий об'єм для регулювання, який розташовується в призмі форсування між відмітками нормального підпірного рівня (НПР) – 121,00 м і форсованого підпірного рівня (ФПР) – 125,00 м, у розмірі 570 млн. м³. Такий протипаводковий комплекс у періоди проходження високих паводків дозволяє зменшити їх вплив за рахунок перерозподілу стоку шляхом акумулювання надлишкових обсягів води у протипаводкових об'ємах для регулювання. Рівні води р. Дністер при високих паводках буде зменшено на два метри.

У той же час, успішна боротьба з паводками на Дністрі потребує вдосконалення методики пропуску паводку та завчасної підготовки водосховищ до прийняття і зарегулювання великих вод, шляхом створення комп'ютеризованої математичної (гідродинамічної) моделі, яка дасть змогу завчасно прогнозувати поведінку паводку і завчасно підготувати водосховища, а також здійснювати аналіз різних сценаріїв пропуску паводку.

Необхідність створення автоматизованих систем пояснюється і тим, що останнім часом зростає потреба в вирішенні численних задач, пов'язаних з підвищенням ефективності оперативного управління водними ресурсами. Деякі задачі ще не мають математичного формулювання. Це задачі без яких не можуть бути створені ефективні системи обліку, проектування, експлуатації водогосподарських систем, від їх вирішення залежить ефективність використання, економія водних ресурсів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана відповідно до одного з пріоритетних напрямків ПрАТ «Укргідроенерго», що пов'язаний із створенням автоматизованої інформаційної системи: «Система планування (прогнозування) та управління водними ресурсами та виробництвом електроенергії на ГЕС та ГАЕС ПрАТ «Укргідроенерго» в умовах функціонування ринку електричної енергії».

Дана робота буде лише частиною автоматизованої інформаційної системи, так як в подальшому планується створити гідродинамічну модель і по

Дніпровському каскаду ГЕС з метою оптимального використання гідроресурсів водосховищ із врахуванням водогосподарських обмежень та максимізації прибутку ПрАТ «Укргідроенерго» при роботі на ринку електроенергії.

Гідродинамічна модель ділянки річки Дністер від гідрологічного посту Заліщики до створу Дністровської ГЕС, відтворена у програмному комплексі MIKE 11, була створена автором під керівництвом спеціалістів ПАТ «Укргідропроєкт», м. Харків та рекомендована до використання у розрахунках трансформації паводків по Дністровському водосховищу.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є удосконалення методів розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища, за допомогою гідродинамічної моделі руху паводкових вод на ділянці річки Дністер від гідрологічного посту Заліщики до Дністровської ГЕС, створеної в програмному комплексі MIKE 11.

Досягнення поставленої мети здійснювалось шляхом розв'язання наступних завдань:

- створення математичної моделі руху паводкових вод на ділянці річки Дністер в програмному комплексі MIKE 11;
- верифікації створеної математичної моделі руху паводкових вод на ділянці річки Дністер на основі фактичних даних паводку, що мав місце у липні 2008 року;
- аналізу існуючих методик пропуску паводків на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища;
- розробки методики розрахунку пропуску паводків через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води, з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища.

Об'єкт досліджень – процес проходження паводку на досліджуваній ділянці р. Дністер та його гідрологічні характеристики.

Предмет дослідження – методика розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли з врахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховищ.

Методи дослідження. Для побудови гідродинамічної моделі та здійснення подальших розрахунків застосовувались методи математичного моделювання гідрологічних параметрів. Дослідження проводились у програмному комплексі MIKE 11, який забезпечує можливість розрахунків неусталеного режиму потоку з використанням неявної краєво-різницевої схеми розрахунку для різних режимів потоку. В основі розрахунків є розв'язання повних нелінійних рівнянь Сен-Венана для потоків у відкритих розгалужених руслах.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше враховано вплив характеристик паводкової хвилі на розрахункове значення максимальних скидних витрат, завдяки чому зменшено обсяги максимальних скидних витрат через середньонапірний гідровузол (на прикладі Дністровського гідровузла), а також визначено час добігання паводкової хвилі до створу ГЕС;
- удосконалено «Методику розрахунку пропуску паводків через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища»;
- набуло подальшого розвитку застосування програмного комплексу MIKE 11 для створення математичної моделі руху паводкових вод на досліджуваній ділянці річки Дністер, що базується на рішенні повних нелінійних рівнянь Сен-Венана для потоків у відкритих розгалужених руслах для визначення руху паводкової хвилі по Дністровському водосховищу;

- здійснено верифікацію створеної математичної моделі з використанням даних реального паводку, який відбувся у липні 2008 року.

Створена гідродинамічна модель в подальшому слугуватиме інструментом для здійснення відповідних розрахунків та пропуску паводків через Дністровський гідровузол різної забезпеченості за рахунок зрізання (зменшення) максимальних витрат через Дністровський гідровузол.

Практичне значення отриманих результатів. Запропонована «Методика розрахунку пропуску паводків через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища» визначає рекомендації щодо дій при проходженні паводків різної забезпеченості, та гарантує зменшення максимальних витрат через Дністровський гідровузол шляхом завчасного спрацювання водосховища, та подальшого його наповнення при добіганні паводкової хвилі максимальними витратами до створу Дністровської ГЕС.

Гідродинамічна модель руху паводкових вод на ділянці річки Дністер від гідрологічного посту Заліщики до створу Дністровської ГЕС, створена у програмному комплексі MIKE 11, допоможе вирішувати наступні задачі:

- формувати короткострокові і довгострокові гідрологічні прогнози;
- комплексно аналізувати водозабезпечення у басейні р. Дністер;
- виконувати водно-енергетичні розрахунки і розрахунки оптимального виробництва електроенергії;
- розраховувати час добігання води від гідрологічного посту Заліщики до створу Дністровської ГЕС;
- будувати сценарії використання водних ресурсів та здійснювати розрахунки і порівняльний аналіз для умов маловоддя та паводку.

Основні наукові результати та рекомендації дисертаційної роботи застосовуються при прогнозуванні та оптимізації використання гідроресурсів через Дністровський гідровузол з метою планування роботи ГЕС та ГАЕС

ПрАТ «Укргідроенерго» на ринку електричної енергії, особливо в паводковий період (Акт про впровадження наукових результатів дисертаційного дослідження від 25 лютого 2021 р. у Додаток А).

Особистий внесок здобувача. Результати наукового дослідження, викладені в дисертації, отримані автором особисто. З наукових праць, що опубліковані у співавторстві, в дисертації використано тільки ті ідеї та положення, які є результатом особистої роботи та становлять індивідуальний внесок автора.

Автором виконано аналіз літературних джерел щодо розрахунків неусталеного руху паводкової хвилі по водосховищу, розглянуто існуючі методи та методика для чисельних розрахунків цього явища. Опрацьована одна з найбільш використовуваних методик для розрахунків неусталених режимів потоку з використанням неявно краєво-різницевої схеми та для різних режимів потоку, що базується на двовимірному рівнянні Сен-Венана.

Були розроблені рекомендації щодо існуючої схеми пропуску паводку через Дністровський гідровузол у вигляді запропонованої автором «Методики розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища». Методика відпрацьована автором у створеній гідродинамічній моделі руху паводкових вод на ділянці річки Дністер (від гідрологічного посту Заліщики до Дністровського гідровузла) у програмному комплексі MIKE 11, та буде використовуватися як основний інструмент для розрахунків неусталених режимів потоку з використанням неявно краєво-різницевої схеми та для різних режимів потоку.

Проведено верифікацію створеної гідродинамічної моделі на основі фактичних даних паводку, який відбувся у липні 2008 році, та підтверджено її відповідність реальним процесам, що відбувалися у басейні р. Дністер на досліджуваній ділянці.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались:

1. Міжнародна науково-технічна конференція “ПАТ Укргідропроєкт”, м. Харків, 2013 р., де зробила доповідь на тему: “Варіанти актуалізації вибору площадок і уточнення основних параметрів ГЕС Верхньо-Наринського каскаду”, за яку була нагороджена дипломом III ступеня.

2. Конкурс молодих спеціалістів в ЗАП “Сибірський енергетичний науково-технічний центр”, РФ, м. Новосибірськ, 2013 р., де зробила доповідь на тему: “Напірні водоводи Канівської ГАЕС: Вибір варіанту конструкції температурно-осадкових компенсаторів”, за яку була нагороджена «Спеціальним призом» в секції «Гідротехнічних споруд».

3. Студентська науково-технічна конференція секції “Гідроенергетики та гідравлічних машин НУВГП”, де зробила доповідь на тему: “Досвід експлуатації горизонтальних гідроагрегатів на ГЕС”, 2014 р.

4. 14-та Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону», м. Львів, 2015, де зробила доповідь на тему: «Гідравлічний режим в нижньому б’єфі Каховської ГЕС після розширення (створення ГЕС-2) при добовому регулюванні потужності».

5. VII Міжнародна науково-технічна конференція гідроенергетиків «Стійкий розвиток гідроенергетики, як основа мобільності і маневреності ОЕС України», Київ, 2015, де зробила доповідь на тему «Пропуск паводків через Дністровський Гідровузол на основі прогнозів припливності з урахуванням неусталеного руху паводкової хвилі по водосховищу».

6. Водний форум. «Актуальні проблеми використання та охорони водних ресурсів і перспективи розвитку водного господарства», НУВГП, Рівне – 2015.

7. Научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии» ВНИИГ, г. Санкт-Петербург – 2015, де зробила доповідь на тему: «Гидравлический режим в нижнем бьефе Каховской ГЭС после строительства ГЭС-2 при суточном регулировании мощности».

8. Науково-технічна конференція на кафедрі ГЕ, ТЕ та ГМ, Рівне – 2016, де зробила доповідь на тему: «Розробка сучасної методики пропуску паводків через Дністровський каскад гідровузлів на основі прогнозів приливності з врахуванням неусталеного руху паводкової хвилі».

9. 15-та Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону», м. Львів, 2016, де зробила доповідь на тему: «Пропуск паводків нормативної забезпеченості через Дністровський гідровузол на основі прогнозів приливності».

10. X-та Міжнародна науково-практична конференція «Нетрадиційні поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні», м. Львів, 2019, доповідь на тему: «Гідравлічні розрахунки пропуску паводка через каскад з п'яти ГЕС на р. Шопурка в програмному комплексі Mike 11».

11. VII науково-практична конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку, аналіз і керування електроенергетичними системами. Новітні досягнення у проведенні тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу», с.м.т. Славсько Львівської області, 2020, доповідь на тему: «Створення інформаційної системи управління водноенергетичними режимами ГЕС і Каскадів ГЕС».

12. Позачергове засідання науково-технічної ради (НТР) ПрАТ «Укргідропроєкт» від 24 лютого 2021 р., м. Харків.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць, з них 5 статей у фахових виданнях України, 1 стаття входить до науково-метричної бази Scopus та 4 публікації є матеріалами наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 176 сторінок, який включає 25 таблиць і 57 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАВОДКІВ

1.1. Умови формування паводків

Для усіх річок, у яких на водозаборах спостерігається нерівномірність випадання атмосферних опадів, паводки й повені виступають характерними явищами. Характер проходження паводків та обсяги паводкових вод значною мірою залежать від інтенсивності, тривалості та обсягів атмосферних опадів або запасів води у сніговому покриві та інтенсивності утворення талих вод.

Формування паводків, зазвичай, відбувається під впливом природних чинників: танення снігу, дощові опади, тощо. Проте, природній процес сезонних повеней та значних паводків змінюється під впливом техногенного характеру, які виступають головними чинниками зростання загроз від катастрофічних затоплень прибережних територій річок: вирубка лісів, масові розорювання, забудови та заселенням людиною заплавної земель, втручання та зміни природних ландшафтів, несанкціоновані відбори гравію та піску з річок, реалізація гідротехнічних заходів на річках та їх берегах, а також на вододілах [12]. Основні причини формування паводків на північно-східному макросхилі Карпат наведено на рис.1.1.



Рисунок 1.1 – Основні причини формування паводків на північно-східному макросхилі Карпат: 1 – надмірні опади; 2 – скупчення води у водозбірних лійках; 3 – стрімке проходження паводка у разі активізації небезпечних

екзогеодинамічних процесів; 4 – несанкціонований відбір гравію;

5 – вирубування лісів.

Лиха від паводків становлять приблизно одну третину від всіх стихійних лих у світі (кількістю та економічними втратами). Проаналізовані тенденції свідчать, що обсяги втрат від паводків в останні роки збільшилися.

Збитки від паводків були надзвичайно серйозні в останні десятиліття, і очевидно, що частота та інтенсивність повеней з кожним днем збільшуються. За минулі десять років збиток, нанесений повенями, склав більше 250 мільярдів доларів. В таких країнах, як Китай, Саудівська Аравія, та ін. повені є рідкісним явищем, але їх вплив є пагубним для всієї держави. Жоден населений район світу не застрахований від паводків.

Періодичність критичних аномалій випадання опадів, призводить до формування або занадто великого, або занадто маленького обсягу водних ресурсів, в результаті чого спостерігаються, відповідно, або повені або посухи, є нормальним компонентом мінливості кліматичних показників, що дуже часто впливає на соціально-економічну ситуацію, а також на навколишнє середовище.

Несприятливий вплив паводків та засух призводить до загибелі живих організмів (в т. ч., людей), втрати власності, масової міграції людей і тварин, деградації довкілля, а також до нестачі харчових продуктів, електроенергії, води та інших життєво важливих ресурсів. Ступінь уразливості від подібних природних лих набагато вище в країнах, що розвиваються, де найменш захищеними є бідні верстви суспільства, а цілковита потреба змушує людей з таких шарів селитися на територіях, найбільш схильних до негативних явищ.

В умовах глобальних кліматичних змін такі процеси у майбутньому будуть повторюватися все частіше і частіше, тому потрібно навчитися захищатися від екстремальних затоплень великих територій.

1.2. Історична довідка проходження визначних паводків в Карпатському регіоні, їх наслідки

Атмосферні опади на ріках Карпатського регіону відбуваються досить часто – приблизно 165 – 175 днів на рік. Тому паводки цих річках спостерігаються дуже часто, і мають як локальний, так і регіональний характер. Якщо перші охоплюють лише басейни окремих річок, то другі – увесь північно-східний макросхил Карпат. При збільшенні добових опадів до значень 100 мм та вище, паводкові води та рівень підняття річок набувають катастрофічного рівня. Паводки, відомі з літописів, фіксували ще у давні часи (на Дністрі – у 1146 р., на р. Тисі – у 1491 р., на р. Пруті – у 1780 р.). Проте, інструментальні спостереження за паводками в Україні розпочалися лише у середині ХІХ століття, спочатку за рівнями підняття річок, а потім і за витратами, а систематичні дані є лише з 1895 р. [13].

За даними Г. Швеця, М. Кирилюка та інших авторів [14, 15], у ХХ столітті у Карпатах відбувалися регіональні паводки, дані по яких наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Дані по регіональних паводках на річках Карпатського регіону

Дата	Наслідки паводку
8 – 9 липня 1911 року	Внаслідок сильних злив рівень води на р. Прут сягав найвищих позначок за весь період гідрометричних спостережень. Максимальна витрата води в цей час біля м. Чернівці становила 5250 м ³ /с, а швидкість поверхневої течії 5–6 м/сек. [14].
30 – 31 серпня 1927 року	Кількість опадів у басейні річок Дністра і Пруту сягала понад 300 мм. Зливові опади затопили в низинах багато сіл і 10 міст [14].
1 – 2 вересня 1941 року	Зливові опади призвели до формування значного паводку в басейнах річок Прут, Дністер, Серета. Максимальні рівні води

	в Дністрі на 1–3 м перевищили найвищі рівні попередніх років [14].
28 – 30 грудня 1947 року	Інтенсивні опади у верхів'ях річок Тиса, Тересва і Теробля та різке підвищення температури повітря від -14°C до $+12^{\circ}\text{C}$, спричинили інтенсивне танення снігу, висота якого була місцями 400 мм. За добу тут випало 130 мм, а з 28 до 30 грудня випало 255 мм снігу [14].
7 – 10 червня 1969 року	Від сильних злив на всьому північносхідному макросхилі Карпат (площа якого становить 22 тис км ²) паводок перевищив усі попередні за висотою підняття рівнів води. Кількість опадів за даний період місцями перевищувала місячну норму [14].
12 – 18 травня 1970 року	Паводки сформували інтенсивні дощі у верхів'ях ріки Тиси та на її притоках. Величина опадів у 2–3 рази перевищувала місячну норму і склала 150–200 мм [14].
22 – 26 липня 1980 року	Внаслідок інтенсивних злив, під час яких випало 200 – 340 мм опадів (більше двох місячних норм), сформувався паводок в басейні ріки Дністра. Злива інтенсивністю понад 100 мм охопила площу близько 15 тис км ² [14].
3 – 5 березня 2001 року	У Закарпатській області випало дві норми місячних опадів. Об'єм опадів, які сформували цей паводок, становив 2 млрд м ³ води. Паводок спричинив значні руйнування та призвів до загибелі 9 осіб.
23 – 28 липня 2008 року	Катастрофічний за масштабами паводок в Україні. 28 липня на території Львівської, Закарпатської, Тернопільської, Чернівецької та Івано-Франківської областей було підтоплено 601 житловий будинок і 33 882 га сільськогосподарських угідь, пошкоджено 360 автомобільних і 561 пішохідний міст, розмиті 680,61 км автомобільних доріг, в результаті чого постраждало 150 тисяч осіб.

червень 2020 року	Стихійне лихо, яке внаслідок інтенсивних грозових дощів спричинило значне підвищення водності річок західних регіонів України, зокрема, Дністра, Прута, Черемошів, Бистриці. Пік паводку припав на 23 - 27 червня. Його вважають найбільшим в історії Західної України за останні 60 років. Загальні збитки від повені оцінили на суму 3 - 4 млрд гривень.
-------------------	--

Значні паводки за останні 25 років спостерігалися у 1995, 1997, 1998, 2001, 2008, 2020 роках, та призвели до виникнення надзвичайних ситуацій у західних регіонах України. Середньорічні збитки від паводків протягом 1995-1998 рр. склали 899,3 млн. грн., протягом 1999-2007 роках – понад 1,5 млрд. грн., а у 2008 році – близько 6 млрд. грн.

Приклад наслідків паводку 2008 року наведено на рис.1.2.



Рисунок 1.2 – Катастрофічний паводок 2008 року

Майже через кожні два – три роки відбуваються локальні катастрофічні паводки.

Слід зазначити, що Д. Зорін [12] побудував графіки коливань глобального клімату Землі на весь період її геологічної історії. Це 13 циклів, – різнопорядкових синусоїд, починаючи від 250 млн. р. Галактичного року, до 33,

5-6 і 3-4-річних циклів останніх 150 років, коли вже застосовували інструментальні спостереження (рис.1.3).

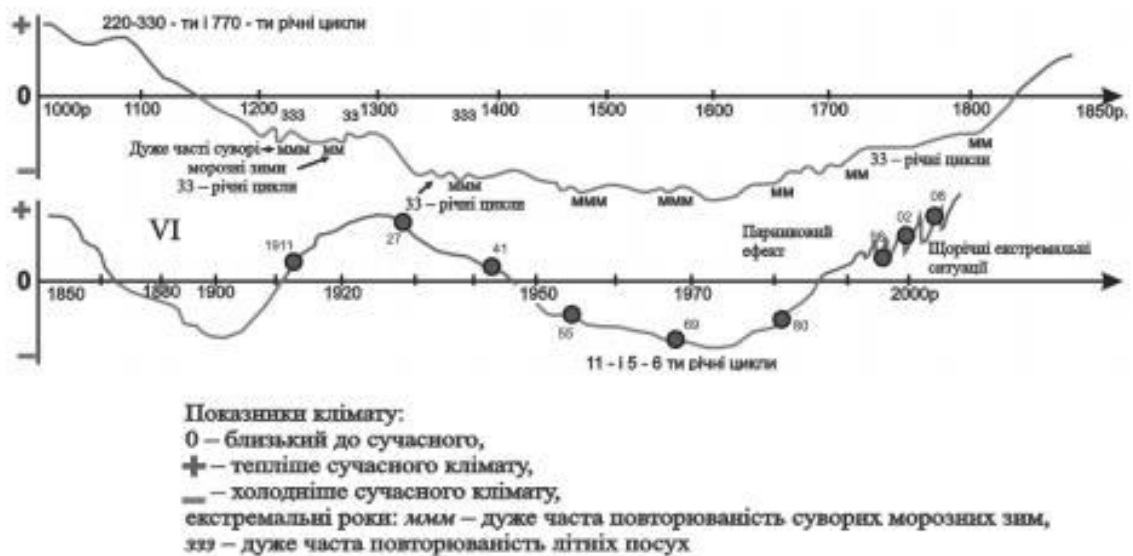


Рисунок 1.3 – Циклічність змін клімату Землі за останні 1000 років
 (крапками позначені роки катастрофічних паводків)

З 90-х років минулого століття плавна синусоїда кліматичних коливань перетворилася на ламану (пилоподібну) лінію, що свідчить про часту повторюваність аномальних ситуацій – повеней, посух, буревіїв і ін.

Зміна клімату вже впливає на наше життя, і з кожним роком наслідки будуть тільки посилюватися. На скільки будуть серйозні наслідки, залежить від того, на скільки ми готові прогнозувати та планувати водні запаси та реагувати на кліматичні тенденції [16].

1.3. Сучасний стан дослідження проблеми розрахунку неусталеного руху води в річках

Математичне моделювання неусталеного руху потоку основою якого є розробка і вирішення математичних залежностей, що реалізує відомі закони гідравліки, покладені в роботах Барре де Сен-Венана і Ж.В. Буссінеска, які розробили рівняння неусталеного руху. Важливі теоретичні положення були розроблені в першій половині 20-го століття, але, практичне застосування для руслових потоків пов'язане з розвитком розрахункової техніки.

На сьогодні існує багато методів розрахунку неусталеного руху води у відкритих руслах. М.С. Грушевський [9], поділяє їх на строгі і спрощені.

Строгі методи (їх ще називають детальними, гідравлічними або гідродинамічними) засновуються на числовому розв'язанні одновимірної системи рівнянь Сен-Венана.

Спрощені методи не засновані безпосередньо на вирішенні одновимірної системи рівнянь (їх ще називають інженерними). Рівняння Сен-Венана замінюється іншим виразом, наприклад зв'язком між витратою і об'ємом води на розрахунковій ділянці. Деякі чисельні методи у своїй роботі [17] описують Ж.А. Кюнж, Ф.М. Холлі, А. Вервей.

Допустимість опису руху рівняннями Сен-Венана для практичних цілей підтверджується достатньо адекватними результатами розрахунків для звичайних умов (відкрите, стійке, без заплав гирло) з численними даними натурних спостережень і лабораторних експериментів про що пише у роботі [18] М.С. Грушевський. Також розрахунками неусталеного руху води по водосховищах займався О.А. Рябенко [19].

Вибір методики розрахунку для конкретної задачі залежить від багатьох обставин, таких як: постановка задачі, вимоги до точності її розрахунку, специфіки об'єкта, наявної вихідної інформації, її надійності і точності, наявність відповідної вимірювальної техніки, кваліфіковані фахівці і т. п.

Методики прогнозування паводків на основі гідрологічних моделей різної складності мають як сильні сторони, так і обмеження, які не дають можливість отримати достовірні результати. Як свідчать результати досліджень Ф. Дотторі, Г. Бальдасарре, Е. Тодіні Х. Сонг, Дж. Чжан, Ч. Чжан, Ю. Сюань, М.Ч. Сю [1, 2], є тенденція розгляду питань, присвячених удосконаленню існуючих методик прогнозування паводків, на основі гідрологічних моделей з використанням змінних і постійних вихідних даних.

Розглядаючи потенціал процесу удосконалення існуючих методик прогнозування паводків на основі гідрологічних моделей, важливо відзначити, що обговорення зазвичай досягають кульмінації з концепцією невизначеностей.

Більшість досліджень, що відносяться до моделювання паводків, повідомляє про наявність невизначеностей в існуючих моделях паводків [3].

Аналіз невизначеності включає оцінку повноти вихідних даних моделі і їх вплив на результати розрахунку про що пишуть Ж. Холл та Д. Соломатин у своїй роботі [4]. Аналіз чутливості допомагає зрозуміти характеристики моделі паводків за різними параметрами, наприклад топографії та коефіцієнту тертя Меннінга [5].

За останнє десятиліття спроби удосконалення існуючих методик прогнозування паводків на основі гідрологічних моделей широко обговорювалися в літературі з моделювання паводків, такими вченими як: Д.С.Мейсон, П.Д. Бейтс, Дж. Далл-Аміко [6], але все ще стверджується, що існуючі моделі паводків не досягли прийнятної межі калібрування про що стверджують Н.М. Хантер, П. Бейтс, М.С. Горритт, М.Д. Вілсон [7]. Це пов'язано з обмеженою доступністю відповідних вихідних даних, які мають вирішальне значення при моделюванні паводків.

Існує велика кількість методик чисельного вирішення рівняння нерозривності потоку в розгалужених руслах, деякі з яких описані [9]. Але необхідно враховувати той факт, що кожна річка має свої гідрологічні характеристики і особливості, тому існуючі методики потребують пристосування до відповідних умов або застосування досліджень на річках-аналогах з подібною гідрологічною ситуацією [10]. Також важливим фактором є зміна клімату, і це необхідно також враховувати у розрахунках [11] та відсутність оперативної гідрології, про що пишуть В.М. Бойко, Л.В. Петренко в роботі [20].

Необхідно зробити акцент на те, що сьогодні контроль за рівнем паводкових вод та удосконалення методик прогнозування не можливий без застосування математичного моделювання про що в своїй роботі [21] пишуть Л.М. Заміховський, О.І. Клопоущак.

Методами і проблемою розрахунків неусталеного руху води у відкритих руслах, також займалися Е.М. Прейссман, О.Ф. Васільєв, Д.Ж. Гунаратман, Ф.Е. Перкінс, Р.Ю. Шеннон, Г. В. Железняков, В. П. Рогунович,

Д.В. Штеренлихт, В.А. Прокоф'єв, В.В. Беліков, А.Н. Мілітєв, А.М. Прудовський, Ж.А. Кюнж, Ф.М. Холлі, А. Вервей, В.Б. Радіонов, О. А. Рябенко, М.М. Хлапук, Р. Хоса, Р. Холдар та багато інших, як вітчизняних і закордонних вчених, які працювали над створенням та удосконаленням методів та методик розрахунків, використовуючи результати модельних досліджень намагаючись з певним наближенням чисельно розв'язати рівняння Сен-Венана.

1.4. Аналіз методів і систем контролю та прогнозування рівня паводкових вод

Важливим елементом зменшення впливу паводків є управління ризиками: завчасне передбачення цих небезпечних процесів, виявлення основних причин розвитку повеней та паводків (природних та антропогенних чинників), розробка заходів із зниження їх впливу до допустимого рівня. Зниження ризику затоплення внаслідок катастрофічних повеней і паводків полягає у виконанні наступних дій: прогноз і здійснення заходів для попередження, реагування та ліквідація наслідків. Основним інструментом системи управління ризиками затоплень є план управління можливого розвитку цих небезпечних процесів [21, 22]. Таким чином, актуальним є здійснення контролю та прогнозування рівня паводкових вод з метою попередження та/або зменшення можливих збитків від їх наслідків в різних секторах економіки України (аграрному, промисловому та соціальному).

Прогнозування паводків (гідрометеорологічні прогнози) з гідрологічної точки зору в залежності від часу попередження поділяються на: короткострокові (менше 12-15 днів) і довгострокові (з більшою завчасністю) [23].

Методи короткострокового прогнозування базуються на використанні закономірностей руху води в руслах і закономірностей припливу (стоку) води до досліджуваних ділянок цих русел, а також на розрахунках переміщення і корегування водного потоку на окремих ділянках річки. Результатами таких прогнозів є очікувані максимальні витрати і рівні води. Вихідними даними при цьому є гідрографи (залежності витрат води від часу).

Довгострокові гідрологічні прогнози застосовуються, як правило, для визначення масштабів повені та її наслідків. Методики довгострокового прогнозування максимальних витрат (рівнів) води за період паводка базуються на встановленні залежності між величиною витрат і стоком під час паводка, які встановлюються для кожного пункту за матеріалами багаторічних гідрометричних спостережень.

Методи контролю за рівнем паводкових вод, з використанням програмно-апаратного забезпечення, поділяють на:

- ручні методи, а саме: розмітка (в метрах) на опорах чи лінійці, що розміщені на берегах рік;

- автоматизовані методи контролю, які поділяються на прямі (давачі рівня, автоматизовані вимірювальні станції) та дистанційні методи вимірювання, а саме: космічні (супутникові знімальні системи); авіаційного базування (літаки, гелікоптери).

Необхідно зробити акцент на те, що сьогодні контроль за рівнем паводкових вод та удосконалення методів прогнозування не можливе без застосування математичного моделювання.

Прогнозування рівня паводкових вод здійснюється на основі таких методів:

- алгоритм класифікації зображення на класи «суходіл»/«вода». Цей алгоритм базується на концепції нечітких множин та використанні міри когерентності, що обчислюється на основі інтерферометрії InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Недоліком методу є необхідність використання декількох зображень для реалізації методології InSAR та складність процедури [22, 24];

- нейромережевий метод картографування повеней на основі супутникових зображень (для сегментації та класифікації радіолокаційних зображень застосовуються нейронні мережі Кохонена, що забезпечують інтелектуальний підхід до аналізу даних) [22, 25];

– нечітке прогнозування очікуваних збитків від повеней на основі методу екстраполяцій (у вигляді кількох трендів, побудованих для різних за початком відліку вибіркового рядів динаміки, та застосуванні нечітких множин) [26];

– метод вирішення завдань оперативного прогнозування паводків за даними наземних і радіолокаційних вимірювань опадів. Застосування радіолокатора для вимірювання опадів дозволяє одночасно охоплювати великі території і отримувати значний об'єм інформації, яку необхідно опрацювати в реальному масштабі часу [22, 27].

Існують й інші методи прогнозування рівня паводкових вод.

Існуючі методи обробки радіолокаційних зображень мають наступні недоліки: необхідність ручного налаштування порогових значень та параметрів для сегментації зображень; необхідність використання декілька зображень; відсутність просторового взаємозв'язку між пікселями зображення (зазвичай використовується попіксельна обробка).

Деякі системи для прогнозування повеней і паводків знаходяться на стадії розробки, такі як: інформаційно-вимірювальна система «Прикарпаття» [28]; INTERREG ІІВ CADSES/TACIS «Покращення системи управління паводками – МОЗЕС» [29]; автоматизована інформаційно-вимірювальна система (AIBC) «Тиса» [30].

Геоінформаційна система (ГІС) – сучасна комп'ютерна технологія, що дозволяє поєднати модельне зображення території (електронне відображення карт, схем, аерозображень земної поверхні) з інформацією табличного типу (різноманітні статистичні дані, списки, економічні показники тощо). ГІС дозволяє забезпечити збір інформації про навколишнє середовище, аналіз стану і динаміки екологічної ситуації в Україні та її регіонах. Інформація, яка використовується в геоінформаційних системах, є відкритою, і її можна використовувати для дослідження, моделювання та прогнозування рівня паводкових вод. Існують такі сучасні ГІС, як: глобальна база даних природно-ресурсної інформації (Проект Grid) та база даних про стан забруднення ґрунтів, водних ресурсів (Проект Gorine) [31].

1.5. Висновки та задачі дослідження

Фактично, на поточний момент ефективність систем контролю за рівнем паводкових вод та методів і систем прогнозування повені, паводків і підтоплення є недостатньою. Відсутність сучасного цілісного комплексу заходів із попередження та регулювання паводків призводять до щорічних значних економічних збитків та погіршення екологічного стану довкілля.

Одним із напрямків вирішення вказаної проблеми є використання комп'ютерного моделювання. Саме цим шляхом ми будемо вирішувати поставлену задачу. Бурхливий розвиток комп'ютерного моделювання у всіх областях науки і техніки в останні десятиліття викликано, перш за все, економічними причинами: вартість фізичної моделі зазвичай в кілька разів більше вартості розробки аналогічної чисельної моделі. Другий, не менш важливою, причиною стала можливість комп'ютерного моделювання таких фізичних явищ, які не можна досліджувати в натурних або лабораторних умовах. Цілком очевидно, що створення фізичних гідравлічних моделей ділянок і басейнів річок протяжністю сотні і тисячі кілометрів нереально (в силу масштабного ефекту) не тільки в сьогоденні, але і в майбутньому.

Отже, безальтернативним варіантом для дослідженні повеней, паводків є комп'ютерне моделювання.

Важливість задачі моделювання повеней визначається, зокрема, тим, що згідно зі світовою статистикою з усіх стихійних лих до найбільших економічних збитків призводять повені. Збиток пов'язаний, з одного боку, із значними площами затоплених територій, з іншого боку – зі стійкою тенденцією випереджаючого розвитку великих міст, центрів промисловості та енергетики на берегах річок, озер і морів (в тому числі, через водопостачання).

Комп'ютерні гідравлічні моделі басейнів річок дозволяють завчасно підготувати прогноз проходження по річці паводку як природної, так і техногенної природи, та оцінити його наслідки. Чисельна гідравлічна модель басейну річки є базою, що дозволяє поєднати різні заходи, спрямовані на мінімізацію негативних наслідків катастрофічних повеней, і надати їм загальну

смыслову спрямованість. Крім того, чисельна модель дозволяє в реальних умовах повені допомогти в оперативному підпорядкуванні діями і виборі найбільш ефективних заходів по мінімізації наслідків повені. Комп'ютерне моделювання забезпечує розрахунки і відображення плину річки і процесів формування русла. У деяких випадках до комп'ютерних моделей відносять цифрові карти, в інших – розрахунки окремого завдання за емпіричними формулами, що слід віднести до розрахункових методів або способів візуалізації. Комп'ютерні моделі покликані виконувати ідентичні з фізичними моделями функції, тобто імітувати гідродинаміку потоку, стік води і наносів, льодові явища, процеси переформування русла і долин рік. В основі комп'ютерної моделі повинна лежати адекватна натурному математична модель явища.

Для моделювання паводкових вод у дисертаційній роботі було використано програмний комплекс MIKE 11 [8], який дозволяє моделювати паводки і повені, виробляти шляхи евакуації, детально розраховувати прориви гребель, дамб. MIKE 11 моделює карти затоплень, розраховує швидкості і глибини розливу річок і каналів, використовується для моделювання поверхневого стоку, гідравлічного режиму, транспорту наносів і домішок і спеціальних аспектів якості води в системах річок і каналів [32].

РОЗДІЛ 2

МЕТОД РОЗРАХУНКІВ НЕУСТАЛЕНОГО РУХУ ВОДИ НА ОСНОВІ РІВНЯННЯ СЕН-ВЕНАНА ПРИВЕДЕНОГО ДО КОНКРЕТНОЇ ЗАДАЧІ, В РЕЗУЛЬТАТІ АНАЛІЗУ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІЧКИ ДНІСТЕР

При неусталеному (нестационарному) русі води по руслу річки характеристики потоку в будь-якому створі змінюються на протязі часу, а в кожен момент часу вони не однакові по довжині ділянки. Неусталений рух спостерігається при регулюванні витрат в гідровузлах, а в не зарегульованих річках – при проходженні хвилі паводку або повені. Неусталений рух є загальним для руху в річках, а усталений (рівномірний і нерівномірний) – його частковими випадками. Задачею розрахунку неусталеного руху є визначення двох характеристик, що описують стан одномірного потоку (витрати і глибини) як функції довжини і часу. По значенням витрати і глибини можуть бути визначені і інші характеристики, наприклад швидкість потоку.

Необхідність моделювання неусталеного руху в річкових системах пов'язана з наявністю ряду задач, які висуває в даний час практика водогосподарського будівництва і пов'язані з нею задачі управління водними ресурсами, одною з яких є розрахунок і прогноз паводків і повеней для природніх (не зарегульованих річок) та зарегульованих (з каскадом гідровузлів).

При вирішенні більшості практичних задач необхідне створення системи гідрологічного прогнозування, що дозволять визначати хід змін витрат і рівнів у всіх створах річкового басейну, які нас цікавлять. У вирішенні таких задач має великий інтерес гідроенергетика.

Особливе значення має прогноз виникнення паводків і повеней, що призводять до затоплень населених пунктів та інших важливих об'єктів. Основними характеристиками наводнення є максимальні рівні і витрати води. Іншими характеристиками, що мають значення для прогнозу можливих наслідків, своєчасного прийняття відповідних заходів є:

- швидкість течії;

- час добігання хвилі паводку;
- швидкість пересування гребня хвилі;
- швидкість підйому рівня води;
- об'єм паводку;
- площа затоплення місцевості.

На сьогодні стоїть питання в тому, що при вивченні наслідків проходження паводків слід розглядати всі фактори, що супроводжують цей процес, щоб мінімізувати економічні і соціальні наслідки паводків.

Велику користь в організації захисних заходів можуть дати гідравлічні моделі басейнів річок, які дозволяють завчасно виконати прогноз проходження по річці паводку, як природнього так і техногенного і оцінити його наслідки. Завдяки можливостям чисельного моделювання з використанням сучасних ЕОМ вирішення задач розповсюдження хвилі паводку є достатньо реальним і точним.

2.1. Фізико-математичні основи руху води в річці Дністер

Математичне моделювання – це система математичних співвідношень, що описують процес чи явище, які вивчаються. Процес складання математичної моделі називається математичним моделюванням. Як і інші види моделей, математична модель представляє задачу в спрощеному вигляді і описує тільки ті характеристики і закономірності, які найбільш важливі для цього об'єкту або процесу. Математична модель дозволяє здійснювати багатосторонній кількісний аналіз. Змінюючи вихідні дані, критерії, граничні умови, кожен раз можливо отримати оптимальне для заданих умов рішення і визначити подальші напрямки пошуку.

Застосування математичного (чисельного) моделювання дозволяє вирішувати задачі, які не так давно неможливо було вирішити традиційними (з використанням фізичного моделювання) методами. При моделюванні річок, що мають велику довжину, лабораторні дослідження басейнів річок в прийнятних геометричних масштабах принципово неможливо, і чисельне моделювання є

єдиним прийнятним по достовірності і реальним по виконанню шляхом вирішення задач [33].

При моделюванні процесів в математичній моделі об'єкту використовуються реальні характеристики річкової системи, тому немає необхідності перерахунку результатів математичного моделювання з моделі на натуру, і відповідно не виникає проблеми критеріїв подібності. Фізичне моделювання складних систем водотоків практично недопустиме через необхідність значного зменшення моделі і проблем перерахунку, тому методи математичного моделювання процесів неусталеного руху в системах складних річкових систем є практично єдиними.

З виникнення ЕОМ з'явилась можливість розробити методи розрахунку і прогнозування водного режиму рік, що знаходяться як в природніх, так і зрегульованих умовах, шляхом чисельного вирішення рівнянь нестационарного руху. Основна проблема при цьому полягає в визначенні числових значень коефіцієнтів рівнянь (морфометричних і гідравлічних характеристик русл).

Неусталений рух в відкритих руслах проявляється у вигляді довгих хвиль в поздовжньому розрізі потоку (довжина таких хвиль в багато раз більша глибини) [19]. Такі довгі хвилі часто називають хвилями переміщення, так як вони переносять значні маси води. Неусталений рух води може виникати у випадку порушення початкового усталеного руху в результаті зміни витрат в деякому створі, який називають створом збурення. Якщо витрата в створі збурення тільки збільшується або тільки зменшується, то хвилю, що виникла при цьому, прийнято називати хвилею одного напрямку. Сама верхня частина хвилі поблизу до її вершини називається гребнем хвилі. Швидкість добігання гребеня хвилі визначається діленням відстані між створами на різницю моментів часу, в які рівні води в створах мають найбільше значення. Тривалість добігання хвилі між даними створами називається часом добігання τ (рис.2.1).

При розповсюдженні хвилі вздовж русла форма гідрографа змінюється – відбувається його трансформація, що є особливо показово для процесу неусталеного руху води.

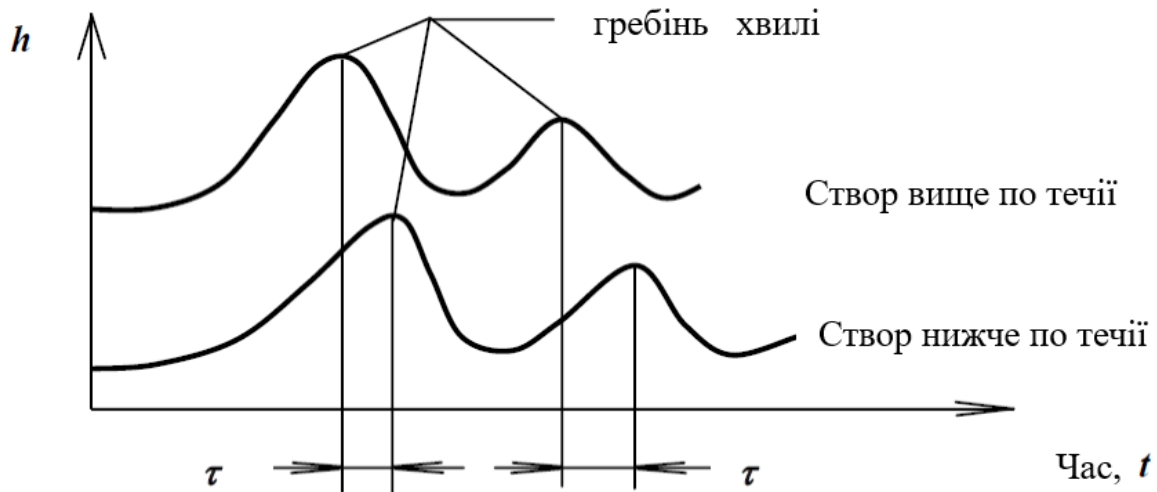


Рисунок 2.1 – Суміщені графіки коливання води на ділянці річки в двох створах

Однією з характеристик трансформації гідрографу є зниження максимальних витрат води від створу до створу, тобто спостерігається розпластання хвилі (рис.2.2).

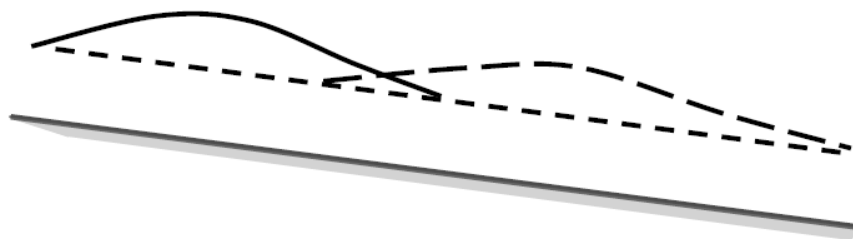


Рисунок 2.2. – Схема розповсюдження хвилі вздовж русла річки

При неусталеному русі води в річках порушується однозначність зв'язку між витратами і рівнями води. Крива витрат приймає форму петлі, називається паводковою петлею (рис.2.3). На підйомі паводку ухили поверхні води більші, ніж на спаді. Це призводить до того, що при однаковому рівні, витрати води більші на підйомі, ніж на спаді, що пояснюється тим, що на підйомі рівнів, живий переріз русла відрізняється більшою пропускнуною спроможністю, ніж при усталеному русі, а тим більше на спаді рівнів.

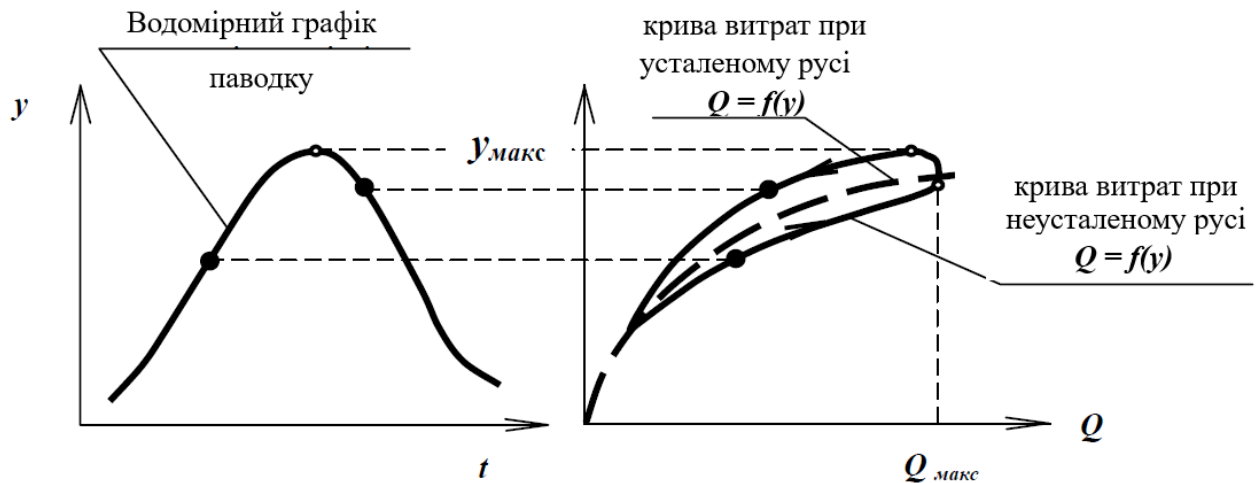


Рисунок 2.3 – Схема паводкової петлі при неусталеному русі в річці

Для розтягнутих, природніх паводків петлі більш менш симетричні відносно кривої витрат усталеного потоку. Якщо хвиля паводку у часі змінюється швидко, то ця симетрія може зникнути [19].

2.2. Рівняння Сен-Венана приведені до конкретної задачі в результаті аналізу гідравлічних характеристик річки Дністер

Математичне моделювання неусталеного руху паводкової хвилі по Дністровському водосховищі виконано на основі розробки і розв'язанні математичних залежностей, що реалізують відомі закони гідравліки, закладені в роботах Сен-Венана і Бусінеска, які розробили рівняння неусталеного руху течії. Важливі теоретичні положення були напрацьовані в першій половині 20 століття, однак практичного застосування для руслових потоків набули з розвитком обчислювальної техніки.

При математичному моделюванні ділянки річки Дністер від гідрологічного поста Заліщики до створу Дністровської ГЕС протяжністю 257,30 км, використовуються рівняння неусталеного руху у відкритих руслах. Ці рівняння:

- представляють собою спрощені моделі складних явищ;
- відображають вплив тільки важливих явищ, які впливають на результати розрахунків;

Основні поняття про рівняння Сен-Венана:

- 1) рівняння застосовується для русл, поперечні перерізи яких можуть мати будь-яку форму і змінюватись вздовж осі;
- 2) рівняння вміщують дві залежні змінні: рівні води y (або глибину h) і витрату Q (або швидкість і глибину);
- 3) задача розрахунку полягає в визначенні залежності основних характеристик руху в різних створах від часу: $Q = f(t)$; $y = f(t)$.

Рівняння Сен-Венана для неусталеного руху води мають наступну підоснову:

- 1) розглядається одномірний неусталений рух, тобто швидкість по поперечному перерізі однакова і рівень води в поперечному напрямі горизонтальний (в розрахунках поперечними і вертикальними складовими швидкості нехтують в порівнянні з поздовжньою складовою);
- 2) кривизна ліній току мала і вертикальні прискорення незначні;
- 3) рух приймається повільно змінним, що дозволяє не враховувати місцеві втрати напору;
- 4) вплив тертя на границях і турбулентність може бути враховано законами опорів, які аналогічні тим, що використовуються при усталеному режимі руху води;
- 5) середній ухил dna русла малий, і косинус кута між лінією dna і горизонталлю може бути прийнятий рівним одиниці;
- 6) приймається гіпотеза довгих хвиль – глибина води рахується малою в порівнянні з довгою хвилею.

Інтегральні залежності

Подальші розрахункові залежності і математичні висновки покладені в основу програми MIKE 11 розробником якої є компанія DHI [8, 32]. Деякі параметри потоку, що використовуються в розрахункових залежностях, представлені на рис.2.4.

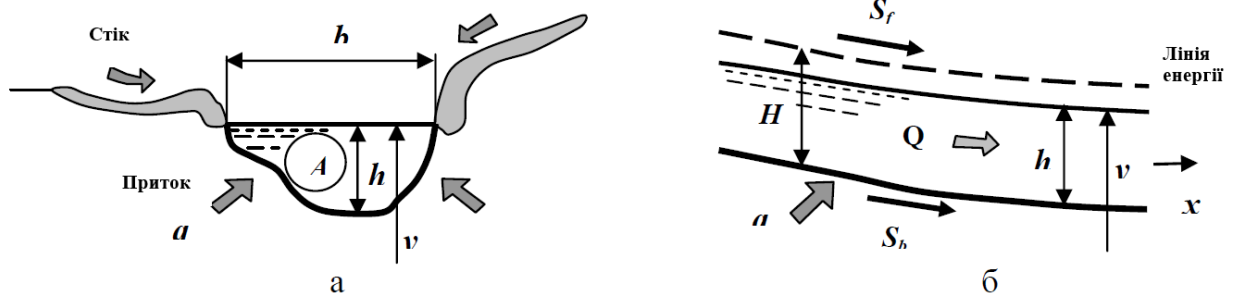


Рисунок 2.4 – Схема русла ріки

а – поперечний переріз річки; б – поздовжній розріз.

Розглянемо деякий об'єм в площині (x, t) між поперечними перерізами $x = x_1$ і $x = x_2$ в момент часу $t = t_1$ і $t = t_2$. На рис.2.5 зображено схему для виведення рівняння неусталеного руху.

Складемо рівняння збереження маси і кількості руху для виділеного об'єму виходячи з позицій, що всі припущення Сен-Венана дотримуються.

Уявим, що потік повільно змінний, а кут α між дном і руслом і віссю x достатньо малий, щоб прийняти $\cos \alpha = 1$. Опираючись на ці передоснови і використовуючи принципи збереження маси і кількості руху у виділеному об'ємі, можна скласти основні рівняння.

Зміна маси в цьому об'ємі визначається часовим інтервалом різниці мас потоку рідини, що входить в виділений об'єм $(\rho u A)_{x_1}$ і що виходить з нього $(\rho u A)_{x_2}$:

$$\int_{t_1}^{t_2} [(\rho u A)_{x_1} - (\rho u A)_{x_2}] dt. \quad (2.1)$$

Ця зміна маси повинна бути рівною зміні об'єму на цій ділянці за вказаний інтервал часу:

$$\int_{x_1}^{x_2} [(\rho A)_{t_1} - (\rho A)_{t_2}] dx, \quad (2.2)$$

де ρ – густина води;

$u = u(x, t)$ – швидкість, рівномірна по поперечному перерізі;

$A = A(x, e)$ – площа живого перерізу.

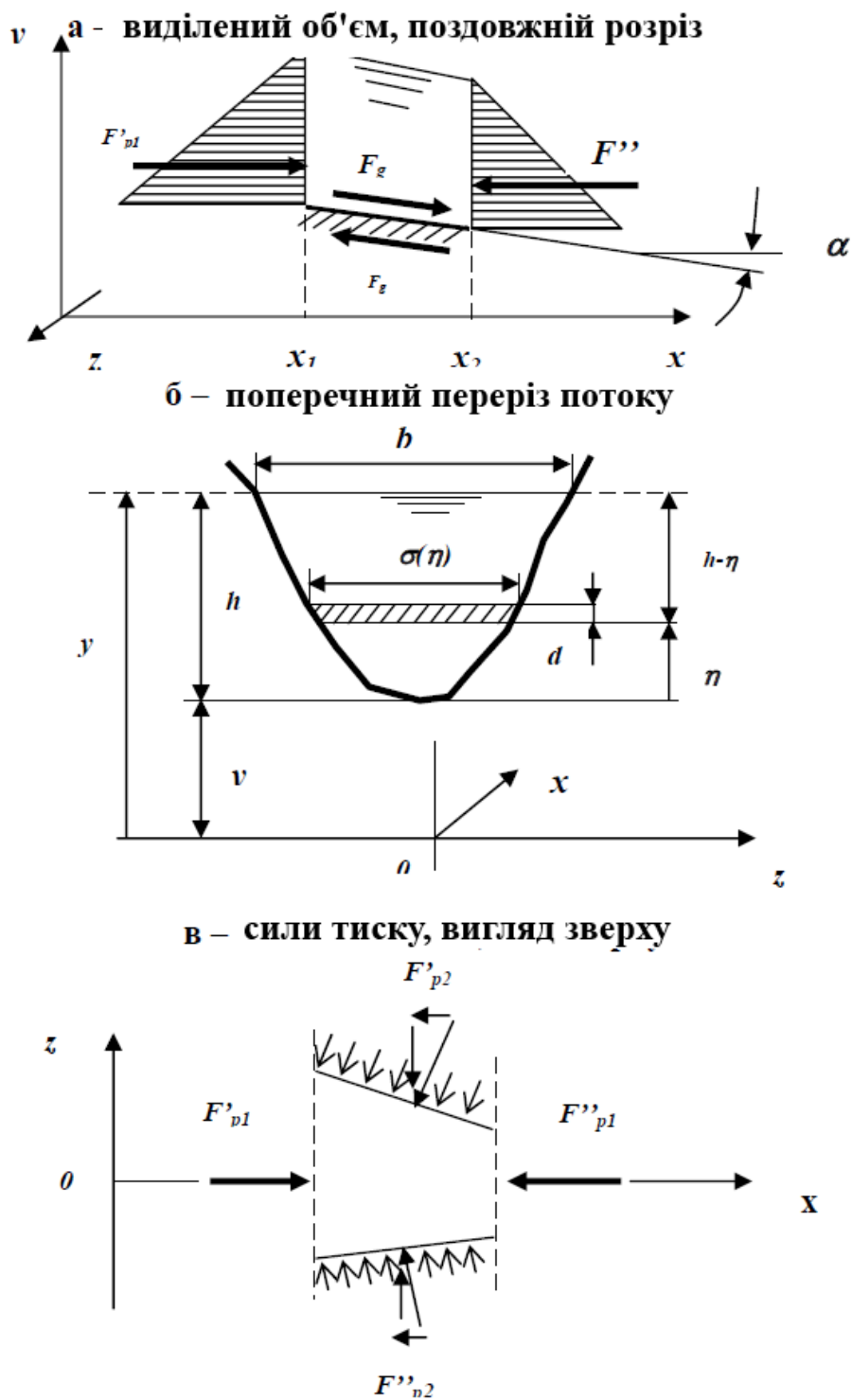


Рисунок 2.5 – Схема для виведення рівняння неусталеного руху

Відповідно при постійній густині інтегральна залежність збереження маси, (рівняння нерозривності) матиме вигляд:

$$\int_{x_1}^{x_2} [A_{t_2} - A_{t_1}] dx + \int_{t_1}^{t_2} [Q_{x_2} - Q_{x_1}] dt = 0, \quad (2.3)$$

де $Q = uA$.

Збереження кількості руху у напрямку x потребує, щоб зміна кількості руху у виділеному об'ємі в моменти часу t_1 та t_2 була рівною сумі потоку кількості руху у виділений об'єм і інтеграла зовнішніх сил, що діють на нього за цей період часу. Кількість руху через живий переріз – це похідна потоку маси на швидкість, тобто

$$\text{потік кількості руху} = \rho u A * \rho u^2 A. \quad (2.4)$$

Потік кількості руху у виділеному об'ємі (кількість руху, що проходить через переріз $x = x_1$, мінус кількість руху, що проходить через переріз $x = x_2$) рівний: $(\rho u^2 A)_{x_1} - (\rho u^2 A)_{x_2}$,

а зміна кількості руху в період між t_1 і t_2 рівна:

$$M_f = \int_{t_1}^{t_2} [(\rho u^2 A)_{x_1} - (\rho u^2 A)_{x_2}] dt. \quad (2.5)$$

Кількість руху в виділеному об'ємі в будь-який момент часу рівна $\int_{x_1}^{x_2} \rho u A dx$,

а збільшення її за період часу від t_1 до t_2 :

$$\Delta M = \int_{x_1}^{x_2} [(\rho u A)_{t_1} - (\rho u A)_{t_2}] dx. \quad (2.6)$$

Припустим, що зовнішні сили, що діють на виділений об'єм є: 1) сила тиску, 2) тяжіння і 3) опір тертя.

1) Сила F_{pl} – це різниця сил тиску F'_{pl} і F''_{pl} , прикладених до границь ділянки x_1 і x_2 . В будь-якому поперечному перерізі x при рівні вільної поверхні $u(x)$ сила тиску у відповідності з законом гідростатичного розподілу:

$$F'_{pl} = g \int_0^{h(x)} \rho [h(x) - \eta] \sigma(x, \eta) d\eta, \quad (2.7)$$

де η – змінна інтегрування по глибині y ;

$h(x, t)$ – глибина води;

$\sigma(x, \eta)$ – ширина поперечного перерізу, при $\sigma(x, t) = b(x)$ – ширина потоку по вільній поверхні. Тоді часовий інтеграл сили тиску F_{pl} , якщо F''_{pl} виражена по (2.7), буде:

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{p1} dt = \int_{t_1}^{t_2} (F'_{p1} - F''_{p1}) dt = g \int_{t_1}^{t_2} [(\rho I_1)_{x_1} - (\rho I_1)_{x_2}] dt, \quad (2.8)$$

$$\text{де } I_1 = \int_0^{h(x)} [h(x) - \eta] \sigma(x, \eta) d\eta. \quad (2.9)$$

Для безкінечно малої протяжності ділянки dx збільшення сили тиску внаслідок зміни ширини характеризується приростом площі живого перерізу $d\sigma d\eta$ при постійному $h=h_0$, помноженому на відстань від центру тяжіння до вільної поверхні $h(x)-\eta$:

$$\rho g \left[\frac{\partial \sigma}{\partial x} dx d\eta \right]_{h=h_0} [h(x) - \eta].$$

Інтегруємо від $\eta=0$ до $\eta=h(x)$ для даного поперечного перерізу, отримаємо повну силу, що діє на виділений об'єм на ділянці від x_1 до x_2 . Інтеграл по контуру виділеного об'єму для інтеграла часу від t_1 до t_2 :

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} \rho g \int_0^{h(x)} [h(x) - \eta] \left[\frac{\partial \sigma(x, \eta)}{\partial x} \right]_{h_0} d\eta dx dt, \quad (2.10)$$

або

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{p_2} dt = g \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} \rho I_2 dx dt, \quad (2.11)$$

де

$$I_2 = \int_0^{h(x)} (h - \eta) \left[\frac{\partial \sigma}{\partial x} \right]_{h=h_0} d\eta. \quad (2.12)$$

2) Сила F_g , викликана силою тяжіння, тобто проекція ваги на вісь русла, визначається з врахуванням ухилу дна:

$$S_0 = -\frac{\partial y_b}{\partial x} = tg\alpha,$$

де y_b – відмітка дна над рівнем відліку і $tg\alpha \approx \sin\alpha$,

$$\int_{t_1}^{t_2} F_g dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} \rho g S_0 dx dt. \quad (2.13)$$

3) Сила F_f – сила опору тертя, що діє на виділений об'єм, виражається через дотичні напруги по дну і стінках русла. Виразимо її для одиниці довжини русла у вигляді $\rho g A S_f$, де S_f – ухил тертя, тобто кут нахилу лінії енергії, необхідний для подолання опору тертя при рівномірному русі. Часовий інтеграл сили опору, що діє на виділений об'єм, буде мати вигляд:

$$\int_{t_1}^{t_2} F_f dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} \rho g A S_f dx dt. \quad (2.14)$$

Умови збереження кількості руху при постійній густині ρ можна представити у вигляді:

$$\int_{x_1}^{x_2} [(uA)_{t_2} - (uA)_{t_1}] dx = \int_{t_1}^{t_2} [(u^2 A)_{x_1} - (u^2 A)_{x_2}] dt + g \int_{t_1}^{t_2} [(I_1)_{x_1} - (I_1)_{x_2}] dt - g \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} \rho I_2 dx dt + g \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} A(S_0 - S_f) dx dt. \quad (2.15)$$

Це рівняння представляє собою інтегральну форму закону збереження кількості руху при неусталеному одномірному потоці в природніх умовах русла будь-якої форми.

Рівняння (2.14) і (2.15) разом утворюють інтегральну форму залежностей для неусталеного руху, які засновані на гіпотезі Сен-Венана.

Диференціальна форма рівняння Сен-Венана

Для пояснення фізичного сенсу рівняння нерозривності в диференціальній формі приведемо його доведення.

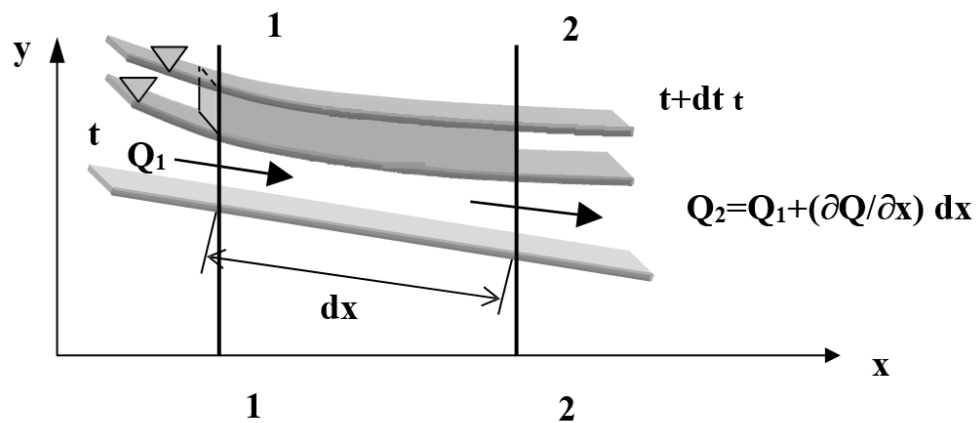


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема рівняння нерозривності

В потоці виділяється маса рідини (рис.2.6), що знаходиться між перерізами 1-1 і 2-2. Через переріз 1-1 за час dt в цей об'єм ввійде об'єм рідини $dW_1 = Q_1 dt$. Через переріз 2-2 вийде $dW_2 = (Q_1 + (\partial Q / \partial x) dx) dt$. У зоні між перерізами об'єм рідини зміниться на величину $dW = dW_1 - dW_2 = Q dt - (Q + (\partial Q / \partial x) dx) dt = - (\partial Q / \partial x) dx dt$. Цей додатковий об'єм рідини спровокує збільшення глибини потоку на ділянці dx на величину dh і площу живого перерізу dA :

$$dA = (\partial A / \partial t) dt.$$

Збільшення об'єму за рахунок збільшення глибини:

$$dV = dA dx = (\partial A / \partial t) dt dx.$$

Прирівнюємо $dW = dV$ і отримуємо $- (\partial Q / \partial x) dx dt = (\partial A / \partial t) dt dx$,

$\partial Q/\partial x + \partial A/\partial t = 0$ – рівняння нерозривності.

Диференціальні рівняння для повільно змінного неусталеного руху можуть бути також отримані з інтегральних рівнянь в допущенні, що залежні змінні є неперервні, диференційні функції. Тоді застосовуючи розклад в ряд Тейлора, маємо:

$$\begin{aligned} A_{t_2} &= A_{t_1} + \frac{\partial A}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \\ Q_{x_2} &= Q_{x_1} + \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \frac{\Delta x^2}{2} + \dots \end{aligned} \quad (2.16)$$

Залишаєм тільки перші похідні і припустимо, що Δx і Δt наближаються до нуля, отримаємо:

$$\int_{x_1}^{x_2} [A_{t_2} - A_{t_1}] dx = \int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial A}{\partial t} dt dx,$$

при $t_2 \rightarrow t_1$;

$$\int_{t_1}^{t_2} [Q_{x_2} - Q_{x_1}] dx = \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial Q}{\partial x} dx dt,$$

при $x_2 \rightarrow x_1$.

Тоді рівняння нерозривності прийме вигляд: $\int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \right] dx dt = 0$.

Аналогічно можна записати:

$$(u^2 A)_{x_2} - (u^2 A)_{x_1} = \frac{\partial(u^2 A)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2(u^2 A)}{\partial x^2} \frac{\Delta x^2}{2} + \dots;$$

$$(u A)_{t_2} - (u A)_{t_1} = \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta t + \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots;$$

$$(I_1)_{x_2} - (I_1)_{x_1} = \frac{\partial I_1}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 I_1}{\partial x^2} \frac{\Delta x^2}{2} + \dots$$

Підставивши перші члени рядів у рівняння (2.15) і переходячи до границь ($\Delta x, \Delta t \rightarrow 0$), отримаємо:

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(u^2 A)}{\partial x} \right] dt dx = -g \int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{\partial I_1}{\partial x} - I_2 - A(S_0 - S_f) \right] dt dx.$$

Якщо ці залежності справедливі для всієї області (x, y) , то вони повинні бути справедливими і для нескінченно малого об'єму, тому можна записати два диференціальних рівняння:

– рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0. \quad (2.17)$$

– рівняння кількості руху:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(u^2 A)}{\partial x} + g \frac{\partial I_1}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) + gI_2. \quad (2.18)$$

Об'єднуючи похідні по x і, замінюючи u на Q/A , отримуємо

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(S_0 - S_f) + gI_2. \quad (2.19)$$

Це дивергентна форма рівнянь. Оскільки праві частини рівнянь (2.17) і (2.19) рівні нулю, то ці рівняння вказують на нульову дивергенцію векторів-функцій маси і кількості руху в межах будь-якого замкнутого контуру області (x,t) , а маса і кількість руху зберігається. При відмінності першої частини рівняння (2.19) від нуля кількість руху не зберігається, при цьому додаткові складові зв'язані з кількістю руху потоку.

Знаходимо похідну рівняння, що вміщає gI_1 :

$$\frac{\partial}{\partial t} (gI_1) = g \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{h(x)} [h(x) - \eta] \sigma(x, \eta) d\eta. \quad (2.20)$$

Застосовуючи теорему Лейбніца про диференціювання інтегралів і приймаючи до уваги, що $\sigma(x, h) = b(x)$, а $\int_0^h \sigma dh = A$, отримуємо рівняння кількості руху, що використовується в інженерній практиці:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uQ) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 \right) + gAS_f = 0. \quad (2.21)$$

Це не дивергентна форма рівняння. Його називають динамічним, так як воно рідко відповідає дійсному збереженню кількості руху або рівнянням динамічної рівноваги.

Розглянемо часткові випадки вибору залежних змінних:

1. $Q(x,t), h(x,t)$. В рівнянні нерозривності змінна $A(h)$ замінюється на

$$\frac{\partial A(h)}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = b \frac{\partial h}{\partial t},$$

а в динамічному рівнянні швидкості u замінюються на Q/A .

Отримуємо систему двох рівнянь руху:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} gA(S_f - S_0) = 0, \quad (2.22)$$

де $b=b(h)$, $A=A(h)$.

2. $Q(x,t)$, $y(x,t)$. Глибина води $h=y-y_b$, де $y_b(x)$ – відмітка дна.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial t}; \quad \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{\partial y_b}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial x} + S_0.$$

Підставивши цей вираз в рівняння (п.1) отримаємо систему:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} gAS_f &= 0, \end{aligned} \quad (2.23)$$

де $b=b(y)$, $A=A(y)$.

3. $u(x,t)$, $h(x,t)$. Підставим у рівняння нерозривності $Q = uA(h)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{A}{b} \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{u}{b} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)_{h=const} &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g(S_f - S_0) &= 0, \end{aligned} \quad (2.24)$$

4. $u(x,t)$, $y(x,t)$. Просторова похідна витрати $Q=uA(y)$ рівна:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = A \frac{\partial u}{\partial x} + u \left[b \frac{\partial y}{\partial x} + \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)_{y=const} \right].$$

Підставивши цей вираз в рівняння в п.3 отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial t} = \frac{A}{b} \frac{\partial u}{\partial x} + u \left(\frac{\partial y}{\partial x} + S_0 \right) + \frac{u}{b} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)_{y=const} &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + gS_f &= 0. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Вибір одного з цих вихідних рівнянь обґрунтовується аналізом гідравлічних характеристик конкретного водотоку.

Всі перераховані рівняння еквіваленти при умові, якщо всі функції і змінні будуть мати, по крайній мірі, одну похідну. Ані інтегральні, ані диференціальні рівняння в цьому вигляді не можуть бути задіяні у випадку гідравлічного стрибка, тобто, якщо рішення мають розриви.

Рівняння динамічної рівноваги напишемо в наступному вигляді:

$$\frac{\partial u}{g \partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{u|u|}{C^2 R} = 0, \quad (2.26)$$

де кожен член є деяким ухилом.

Перша складова $\frac{\partial u}{\partial t}$ ухил, що пов'язаний зі зміною швидкостей у часі, тобто безпосередньо з неусталеним рухом, поблизу ГЕС при пропуску добового регулювання;

Друга складова $\frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x}$ враховує зміну швидкості по довжині, тобто відображає нерівномірність потоку. Ця складова для річок зазвичай не велика і має значну величину лиш в зонах різкої зміни перерізу; при усталеному потоці це відповідає зміні швидкісного напору $u^2/2g$ у просторі. Для безперервних функцій $\frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2g} \right)$;

Третя складова $\frac{\partial h}{\partial x}$ ухил, пов'язаний з зміною глибини по довжині русла;

Четверта складова S_0 це ухил дна річки; сума третьої і четвертої складових є ухилом поверхні води $\frac{\partial y}{\partial x}$;

П'ята складова $\frac{u|u|}{c^2 R}$ це ухил тертя, для річкових б'єфів він відіграє головну роль; в чисельнику цього члена записано похідну швидкості на її абсолютну величину $u|u|$, а не u^2 , так як u^2 не враховує зміну знаку швидкості, що можливо при великій зворотній хвилі. Цю складову іноді представляють у вигляді $\frac{Q|Qu|}{K^2}$, де K – модуль витрати (пропускна спроможність русла).

Перші дві складові враховують вплив на неусталений рух швидкостей частинок води. Їх прийнято називати інерційними членами або ухилами прискорення. Члени рівняння (2.26) мають різну відносну значимість для різних умов.

При наявності бокового притоку води рівняння нерозривності і динамічне рівняння напишемо у наступному вигляді:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{u|u|}{c^2 R} + \frac{qu}{gA} = 0, \quad (2.27)$$

де q – боковий приток на одиницю довжини.

Для того щоб застосувати основоположні рівняння до складних природніх умов, вводимо коригуючі параметри і коефіцієнти, такі як, витратні характеристики для перерізів складних форм, коефіцієнт Буссінеска, що враховує нерівномірність розподілу швидкостей та коефіцієнти шорсткості русла.

При наявності помітного розриву в геометричних і гідравлічних характеристиках водотоку, який характеризують місцеві умови, використовуємо закономірності, які б з'єднували цю ділянку з іншими, для яких справедливі диференціальні рівняння неусталеного руху потоку.

Таким чином, всю модель можна розглянути, як таку, що складається з ряду ділянок, для яких ствердження Сен-Венана справедливі.

2.3. Витратні характеристики і коефіцієнти шорсткості русла

Сила, що діє на одиницю довжини русла в результаті тертя по дну і стінках русла: $\rho g A Sf$.

Ухил тертя Sf тут може бути знайдений по будь-якому емпіричному закону опору. Такі емпіричні закони ґрунтуються на відношеннях між витратою і витратою витрати і мають вигляд:

$$Q = K\sqrt{Sf}, \quad (2.28)$$

де $K = K(h)$ – витратна характеристика русла: $K = AC\sqrt{R}$;

Sf – ухил тертя при усталеному русі.

В розрахунках використаємо формулу Шезі: $Q = \bar{\omega}C\sqrt{RI}$, $K = \bar{\omega}C\sqrt{R}$, де C – коефіцієнт Шезі:

$$C = \frac{1}{n}R^{1/6}, \quad (2.29)$$

R – гідравлічний радіус:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{\bar{\omega}}{\chi}; \quad (2.30)$$

P, χ – змочений периметр;

n – коефіцієнт шорсткості; $kStr = 1/n$.

В цих формулах припускається, що коефіцієнти шорсткості постійні по поперечному перерізу. Коефіцієнти n , C – це емпіричні параметри, які залежать від структури річкового дна, тому вони зазвичай змінюються по ширині поперечного перерізу водотоку.

В річкових потоках без заплав (рис.2.7- а) і з однорідною шорсткістю русла, коефіцієнт шорсткості по змочувальному периметру може бути однаковим, і тоді середню швидкість потоку можна визначити по формулам (1.28) – (1.30).

Якщо форма поперечного перерізу складна і має місце неоднорідна шорсткість по периметру перерізу, то потік поділяємо на декілька зон з різною шорсткістю (рис.2.7-б). Загальну для поперечного перерізу витратну характеристику можна визначити виходячи з припущень про постійний ухил тертя S_f по всій ширині поперечного перерізу. Рівняння для розрахунку опору застосуємо окремо до всіх i -х зон, тоді:

$$\sum_i Q_i = Q \text{ або } \sum_i K_i \sqrt{S_f} = K \sqrt{S_f}, \quad (2.31)$$

де $K_i = C_i h_i^{3/2} b_i$ для формули Шезі і b_i – ширина i -ї ділянки.

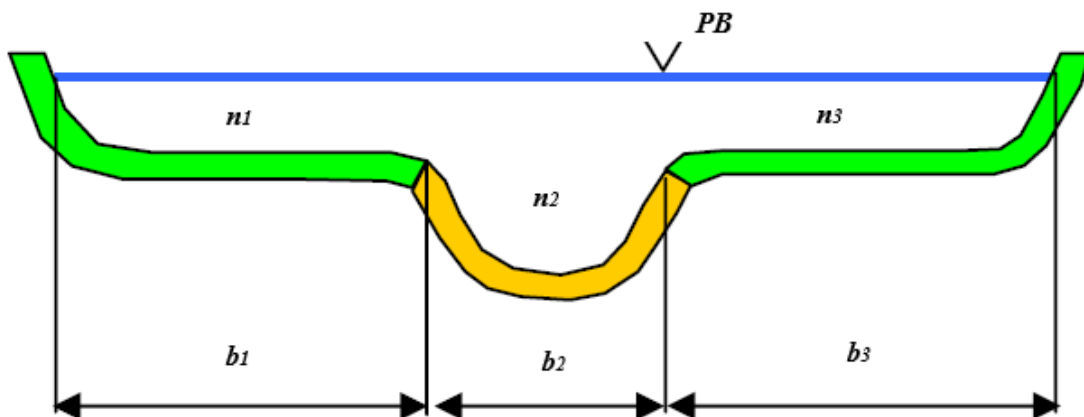


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема до визначення гідравлічних характеристик річного потоку: а – у випадку русла без заплави; б – з заплавою

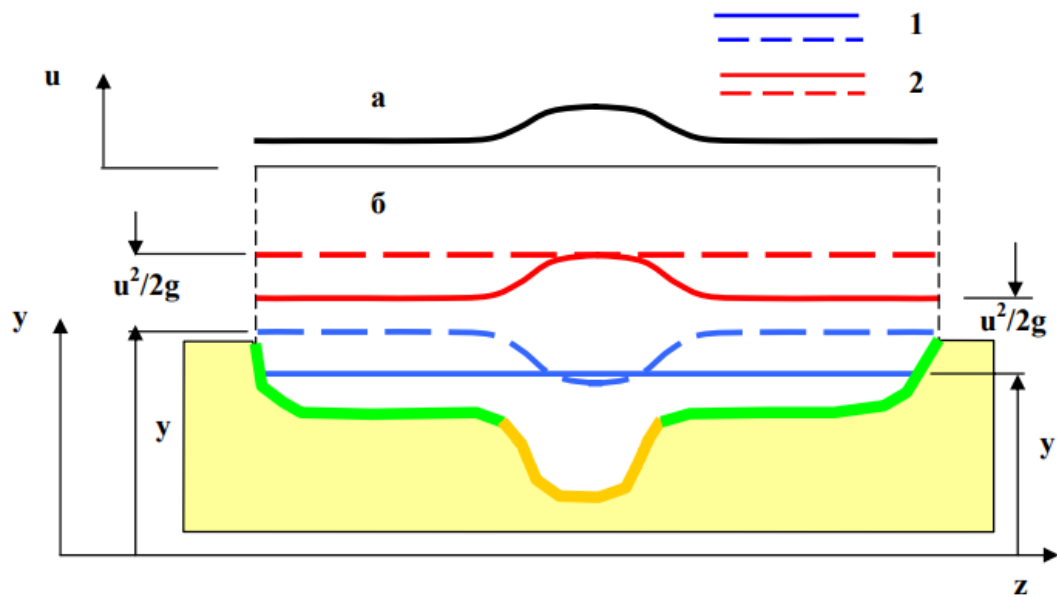


Рисунок 2.8 – Схема припущення постійності рівня енергії і рівня поверхні води: а – нерівномірний розподіл швидкості; б – поперечний переріз потоку;
 1 – горизонтальна поверхня води і непостійність рівня енергії;
 2 – зміна рівня поверхні води і постійний рівень енергії

Рівняння (1.31) знаходиться в протиріччі з прийнятою передумовою для одномірних течій: якщо швидкості по ширині змінюються, то для збереження рівня вільної поверхні постійним, ухил тертя також повинен змінюватись. Відповідно, $S_f = S_f(z) \neq const$. Тому рівняння (2.31) можна записати:

$$\sum_i K_i \sqrt{S_{f_i}} = K_i \sqrt{S_f}.$$

Але якщо рахувати ухил S_f постійним, а горизонтальні швидкості неоднаковими, то вільна поверхня не може бути горизонтальною (рис 2.8). Це протиріччя не виникає тільки тоді, коли витримуються передоснови Сен-Венана про рівномірність розподілу швидкості. Тому припустимо, що і S_f і рівень вільної поверхні постійні. При цьому отримана похибка характеризує різницю між реальною і ідеалізованою одномірною течією.

Допускаючи помилку, що витікає з вказаного протиріччя, приймаємо значення витратної характеристики складного поперечного перерізу по рівнянню (2.31), що дає для формули Шезі:

$$K = \sum_i C_i b_i h_i^{3/2} \quad (2.32)$$

У вітчизняній річковій гідравліці приводиться формула для визначення приведенного коефіцієнта шорсткості Павловського, яка при наявності k частин змоченого периметра з довжинами x_1, x_2, \dots, x_k [9, 34]

$$n_{np} = \sqrt{\frac{x_1 n_1^2 + x_2 n_2^2 + \dots + x_k n_k^2}{x_1 + x_2 + \dots + x_k}}, \quad (2.33)$$

де n_1, n_2, \dots, n_k – коефіцієнти шорсткості для цих частин периметра.

Для простого випадку наявності двох частин змоченого периметра з різною шорсткістю приводиться формула [9]:

$$n_{np} = \left[\frac{x_1 n_1^{1/(0,5+y)} + x_2 n_2^{1/(0,5+y)}}{x_1 + x_2} \right]^{0,5+y}, \quad (2.34)$$

де y – показник степені в формулі Павловського.

2.4. Висновки

Вихідні рівняння, засновані на теорії Сен-Венана, можна застосовувати в моделюванні великих (за протяжністю) ділянок природніх річкових потоків, але рідко для всього потоку, що моделюється.

При моделюванні деякі задачі представляються як явно одновимірні або явно двовимірні. Але так буває рідко, оскільки природні умови тривимірні, і розробнику потрібно використати свою інтуїцію і знання для опису окремих ділянок русла, щоб наблизитись до природніх умов русла ріки.

Таким чином, всю модель будемо розглядати, як таку, що складається з ряду ділянок, для яких положення теорії Сен-Венана справедливі [18]. Кожна ділянка з своїми морфометричними характеристиками та коригуючими параметрами і коефіцієнтами, що відтворюють природні умови досліджуваної ділянки річки.

РОЗДІЛ 3

РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ ПРОПУСКУ ПАВОДКУ ЧЕРЕЗ ДНІСТРОВСЬКИЙ ГІДРОВУЗОЛ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ MIKE 11 В ОСНОВІ НЕЯВНО КРАЄВО-РІЗНИЦЕВОЇ СХЕМИ ПОТОКУ, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА РІВНЯННІ СЕН-ВЕНАНА.

3.1. Рівняння Сен-Венана у дискретній формі і його вирішення за допомогою схеми Еббота-Іонеску

Рівняння Сен-Венана є частковими диференціальними рівняннями з двома незалежними змінними x і t . Від них залежать швидкість u , рівень води y (глибина h) і витрата Q (залежні змінні величини). Такі диференціальні рівняння не мають аналітичного рішення. Основна ідея чисельного рішення цих рівнянь була запропонована в 1928 р. Курантом, Фрідрікса і Леві – за допомогою теорії краєвих різниць і мала тоді виключно теоретичне значення. Масштабного розвитку чисельні рішення отримали лише на початку 60-х років ХХ століття, коли завдяки можливості обробки великої кількості даних за допомогою комп'ютерів виявилось можливим вирішувати різні завдання гідротехніки, які до сих пір не були вирішені. За цей час було розроблено безліч чисельних методів (схем) для вирішення рівнянь Сен-Венана.

Рішення задач (отримання витрат і рівнів води в річкових системах) здійснюють за допомогою дискретизації. Дискретизація – це вираження основних рівнянь руху, написаних для безперервного середовища, через дискретні величини в кінцевому числі точок області течії (рис.3.1).

Дискретизація здійснюється шляхом заміни похідних краєвими різницями і призначення коефіцієнтів при поліномах, які використовуються для інтерполяції між точками, в яких визначаються параметри течії. Рівняння руху, представлені в дискретному вигляді, можуть бути потім вирішені численого з метою знаходження шуканих величин, тобто рівнів і витрат.

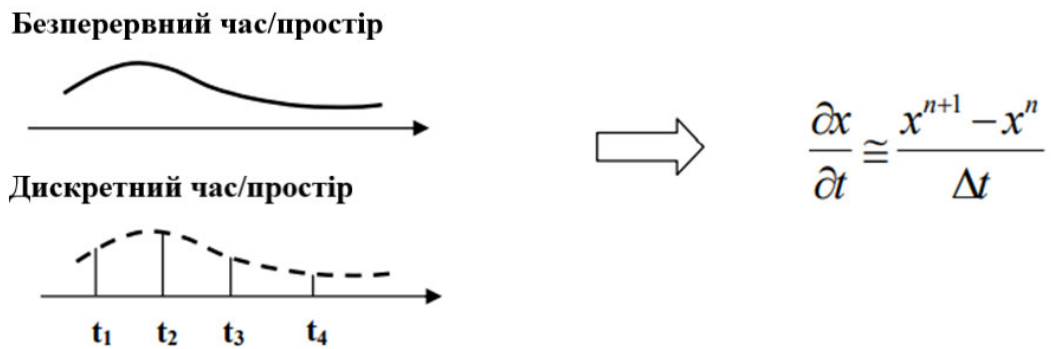


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення безперервного і дискретного часу/простору.

При використанні цього методу переходять від безперервної області існування рівнянь в площині незалежних змінних (x, t) до дискретної сітки точок. Тому цей метод розв'язання рівнянь отримав назву: метод краєвих різниць або метод сіток.

В цьому випадку досліджувану ділянку річки по довжині ділимо на ділянки за допомогою розрахункових точок, а час на кроки часу. Це означає, що чисельні моделі річкових систем дискретизуються по довжині і мають збільшення за часом, тобто вони працюють з краєвим числом розрахункових точок в просторі і часі (рис.3.2). Дискретизація рівняння вирішується для кожної точки (поперечного перерізу) з метою отримання залежних змінних величин. Наприклад, зміну рівня води в створі показано на рис.3.3.

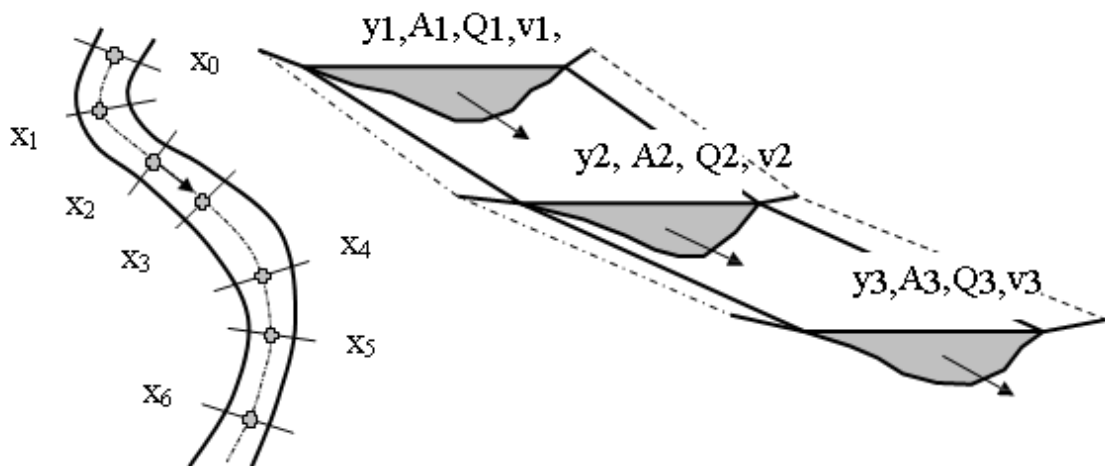


Рисунок 3.2 – Поперечні перерізи, показані на плані ділянки річки і 3-х вимірною картиною потоку з параметрами, що розраховуються в залежності від рівня води
у: A – площа поперечного перерізу; Q – витрата води; v – швидкість потоку

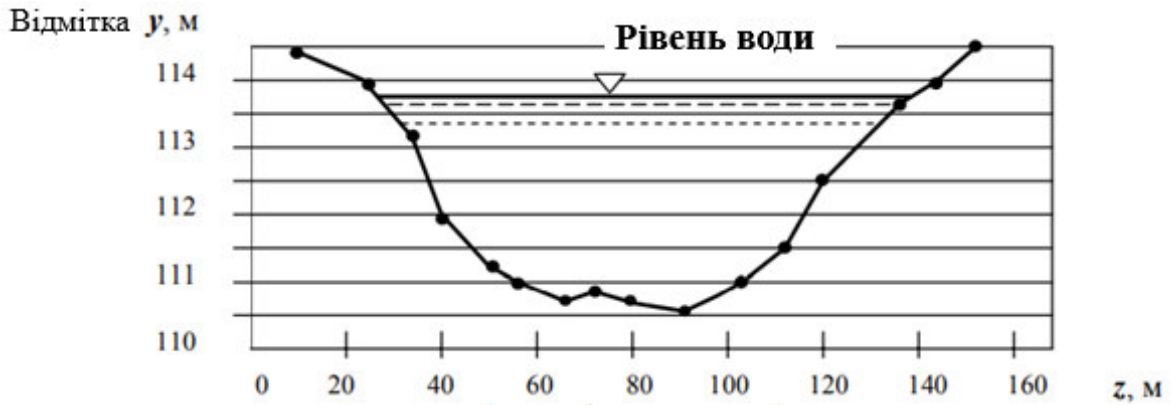


Рисунок 3.3 – Зміна рівнів води у часі в поперечному перерізі

Відстані між суміжними поперечними перетинами можливі більше 1 000 м для великих річок, таких як Дністер. Відстані між поперечними перетинами вибираються в залежності від гідравлічних параметрів потоку з урахуванням того, що при великих змінах в геометрії русла або поблизу контролюючих споруд (мостів і т. п.) вони зменшуються (поперечні перерізи призначаються частіше). Результати обчислень можуть бути представлені у вигляді поздовжнього розрізу, проведеного по розрахункових точках (рис.3.4).

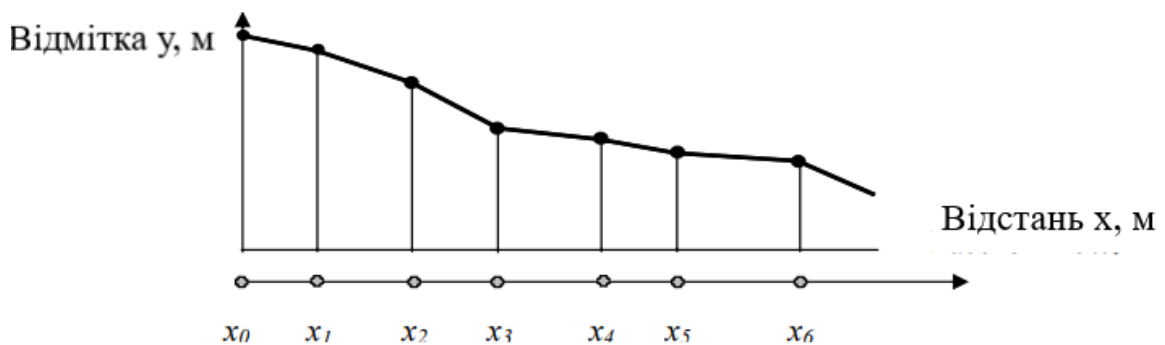


Рисунок 3.4 – Графік зміни рівнів води по довжині річки

Послідовність дій при чисельному методі розв'язання рівнянь можна представити наступним чином (рис.3.5.).



Рисунок 3.5 – Схема розв'язання рівнянь при чисельному методі

Розробка різницевого методу складається з трьох етапів [19]:

1. Вибір різницевої схеми;
2. Оцінка стійкості вибраної різницевої схеми і її сходимість до точного розв'язання вихідної системи рівнянь при зменшенні кроків по незалежним змінним x і t ;
3. Задання порядку розв'язання системи різницевих рівнянь.

Схема Еббота-Іонеску

В цій схемі є дві залежні змінні, наприклад, витрата Q і глибина h , які визначаються в різних точках сітки (рис.3.6 - рис.3.7).

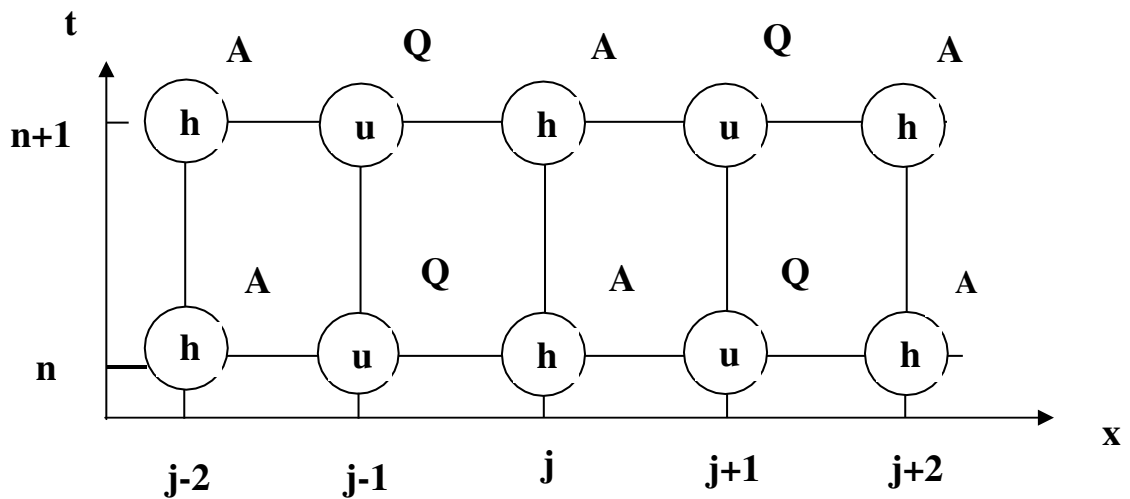


Рисунок 3.6 – Розрахункова сітка в методі Еббота-Іонеску

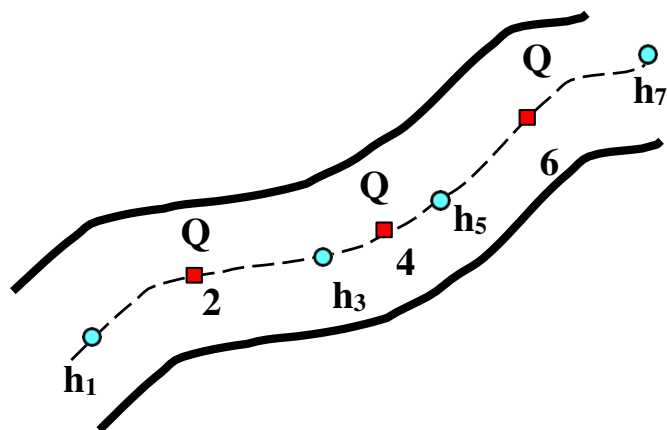


Рисунок 3.7 – Ділянка русла з сіткою розрахунку

Ця схема вперше була запропонована Ебботом і Іонеску в 1967 р. Так як гідравлічні змінні визначаються в різницевих точках, різницева апроксимація похідних в рівняннях $\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial G(f)}{\partial x} = 0$ застосовується не для одного перерізу.

Розглянемо систему однорідних рівнянь течії яка може бути отримана з рівнянь (2.24):

$$g \frac{\partial h}{\partial t} - u \frac{\partial u}{\partial t} - (u^2 - gh) \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \quad (3.1)$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} - u \frac{\partial h}{\partial t} - (u^2 - gh) \frac{\partial h}{\partial x} = 0; \quad (3.2)$$

Першочергово ця схема застосовувалась до вказаної системи шляхом введення в рівняння (3.1) апроксимації похідних в формі:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} &\approx \frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t}; \\ \frac{\partial u}{\partial t} &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{u_{j+1}^{n+1} - u_{j+1}^n}{\Delta t} + \frac{u_{j-1}^{n+1} - u_{j-1}^n}{\Delta t} \right); \\ \frac{\partial u}{\partial x} &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{u_{j+1}^{n-1} - u_{j-1}^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{u_{j+1}^n - u_{j-1}^n}{2\Delta t} \right). \end{aligned} \quad (3.3)$$

а в рівнянні (3.2) в формі:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &\approx \frac{u_{j+1}^{n+1} - u_{j+1}^n}{\Delta t}; \\ \frac{\partial h}{\partial t} &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{h_{j+2}^{n+1} - h_{j+2}^n}{\Delta t} + \frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t} \right); \\ \frac{\partial u}{\partial x} &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{h_{j+2}^{n-1} - u_j^{n+1}}{2\Delta x} + \frac{h_{j+2}^n - h_j^n}{2\Delta x} \right). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Відповідно, різницевий оператор в цій схемі включає вісім точок, тобто по чотири точки на одному часовому рівні (від $j-1$ до $j+2$). Кожне з двох рівнянь системи (3.1), (3.2) апроксимується в різних точках: рівняння (3.1) – в точці j , а рівняння (3.2) – в сусідній точці $j+1$.

Ця схема застосована в програмі МІКЕ 11 до рівнянь руху у вигляді:

$$b_{st} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{Q|Q|}{K^2} = 0. \quad (3.6)$$

Тут використані A (або y -точки) (що відповідають h -точкам на рис.3.6 і рис.3.7. розрахункової сітки. Дискретизація рівняння нерозривності (3.5) виконана з використанням такої апроксимації:

$$\begin{aligned}\frac{\partial y}{\partial t} &\approx \frac{y_j^{n+1} - y_j^n}{\Delta t}; \\ \frac{\partial Q}{\partial x} &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j-1}^{n+1}}{2\Delta x} + \frac{Q_{j+1}^n - Q_{j-1}^n}{2\Delta x} \right),\end{aligned}\quad (3.7)$$

а рівняння кількості руху (3.6):

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q}{\partial t} &\approx \frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n}{\Delta t}; \\ \frac{\partial y}{\partial x} &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{y_{j+2}^{n+1} - y_j^{n+1}}{2\Delta x} + \frac{y_{j+2}^n - y_j^n}{2\Delta x} \right); \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) &\approx \frac{1}{2\Delta x} \left[\left(\frac{Q^2}{A} \right)_{j+2}^{n+\frac{1}{2}} - \left(\frac{Q^2}{A} \right)_j^{n+\frac{1}{2}} \right].\end{aligned}\quad (3.8)$$

Слід звернути увагу на те, що рівняння (3.8) записано символічно; в дійсності для розрахунку точок $j, j+2$, які є h (або A) - точками, не визначені часовий рівень $n+1/2$ і витрата Q . Виходячи з цього, значення Q при $(j, n+1/2)$ і $(j+2, n+1/2)$ повинні бути отримані по інтерполяції.

Схема Еббота-Іонеску представляє собою два інтеграла по контуру, зміщених відносно один одного, так як закон збереження маси (рівняння нерозривності) написаний до A -точок, а рівняння кількості руху написано для Q -точок.

Схема не дає аналітичного рішення для повністю лінеаризованих рівнянь незалежно від відношення $\Delta t/\Delta x$ і швидкості $(gh_0)^{1/2}$. При $\Delta t, \Delta x \rightarrow 0$ розв'язок сходиться до точного, але для кінцевих значень розрахункових інтервалів обидва рішення не можуть співпадати.

Ця схема неявна: для розрахункових точок існує N незалежних $(Q_{n+1}$ і $h_{n+1})$ і $N-2$ рівнянь. Дві граничні умови замикають систему. Граничні умови потрібно задавати уважно: наприклад, не можна задавати умови $Q(t)$ в h -точках.

Підстановка значень похідних в рівняння (3.5) і (3.6) приводить до рівнянь

$$\alpha_j Q_{j-1}^{n+1} + \beta_j y_j^{n+1} + \gamma_j Q_{j+1}^{n+1} = \delta_j,$$

$$\alpha_{j+1}^* y_j^{n+1} + \beta_{j+1}^* Q_{j+1}^{n+1} + \gamma_{j+1}^* y_{j+2}^{n+1} = \delta_{j+1}^*, \quad (3.9)$$

де коефіцієнти α , β , γ , δ , α^* , β^* , γ^* , δ^* є відомими функціями гідрравлічних змінних. Це два лінійних алгебраїчних рівняння, що вміщують величини Q_{j-1} , y_j , Q_{j+1} , y_{j+2} . Для кожної пари точок $(j-1, j)$, $(j+1, j+2)$ можна скласти систему рівнянь. Розв'язок отримуємо в процесі ітерації.

Будь-яка програма математичного моделювання неусталеного руху повинна містити 3 елемента:

1. Інтегральні або диференціальні залежності, що виражають фізичні закони, яким підпорядковується потік.
2. Різницева схема, застосування якої до рівняння потоку дає систему алгебраїчних рівнянь.
3. Алгоритм рішення цих алгебраїчних рівнянь.

Різницеві схеми повинні задовольняти умови сходимості до істинних рішень рівнянь руху.

Основоположний принцип сходимості: при згущенні розрахункової сітки (тобто зменшення кроків Δx і Δt) дискретні рішення рівнянь, яким підпорядковується потік, повинні наближатись до їх точних розв'язків.

Всі краєво-різницеві методи аналізуються по їх стійкості. Неявні методи можуть забезпечувати безумовну стійкість. Схема Еббота-Іонеску є безумовно стійкою у всіх випадках.

3.2. Алгоритм вирішення рівнянь методом «подвійної прогонки»

Залежності в дискретній формі, що забезпечує сходимість, з правильно призначеними граничними умовами дають сукупність алгебраїчних відношень, що містять невідомі гідрравлічні параметри на інтервалі $(n+1) \Delta t$.

Неявні схеми приводим до систем нелінійних алгебраїчних рівнянь, які можна розв'язати методами послідовних наближень (ітерацій). Для вирішення нелінійної системи шляхом ітерацій її спочатку лініаризуємо, тобто, опираючись на відомі значення гідрравлічних змінних, визначаєм коефіцієнти на часовому

інтервалі $n\Delta t$. Після чого цю лінійну систему рівнянь розв'язуємо, отримуємо першу апроксимацію гідравлічних змінних на часовому інтервалі $(n+1)\Delta t$; перераховуємо коефіцієнти, що перетворюють рівняння в нелінійне, використовуючи нові, визначені на часовому рівні $(n+1)\Delta t$ значення гідравлічних змінних, після чого знову вирішуємо лінійну систему для отримання кращої апроксимації гідравлічних змінних, які можна використати для уточнення значень коефіцієнтів і т. д.

Наприклад, коефіцієнти $b^{n+1/2}$, $A^{n+1/2}$, $K^{n+1/2}$ у рівняннях Еббота-Іонеску. Схема Еббота-Іонеску коригує коефіцієнти шляхом їх осереднення між часовим рівнем $n\Delta t$ і рівнем $(n+1)\Delta t$. Для отримання достатньо точного розв'язку необхідні дві апроксимації, тобто два вирішення лінійної системи.

Розв'язок лінійаризованої системи рівнянь здійснюється ітеративним методом подвійної прогонки.

Метод подвійної прогонки

Цей метод застосовується в системах практичного моделювання найчастіше. Це пояснюється тим, що час розрахунку тут росте пропорційно кількості точок N , в той час, як в інших методах – пропорційно N^3 (метод виключення Гаусса). Це значно впливає на час розрахунку, так як розв'язок лінійної системи рівнянь є найбільш затратною по часу операцією всього часу моделювання. Метод викладено стосовно програми MIKE 11.

Розрахункова точка моделі пов'язана, безпосередньо не з усіма точками, а лише з сусідніми. В одномірній моделі точка j зв'язана тільки з сусідніми точками $j-1$ і $j+1$. В квазідвохвимірних моделях, що затоплюють пойми фрагмент i може бути пов'язаний з декількома сусідніми фрагментами $k=1, 2, \dots, K$, але загальне їх число не перевищує шести і лише в рідких випадках десяти. Тому матриця лінійних рівнянь системи буває розрідженою, а для одномірних моделей простих русл розрідженні матриці лінійні і мають три-п'ять діагоналей.

В методах подвійної прогонки для пошуку рішень використовується лінійна матрична структура лінійної системи рівнянь. Метод подвійної прогонки

достатньо простий і особливо ефективний для одномірних моделей послідовних ділянок річок. Але може застосовуватися і для:

- багаторукавних русл;
- двовимірних моделей;
- розгалуженої сітки русл;
- затоплюваних заплав.

У випадку мережі відкритих звивистих русл з притоками створюється топографічна схема з використанням теорії графів. Наглядне уявлення про графі можна отримати, якщо уявити собі деяку множину точок площини x , що називаються вершинами, і множина направлених відрізків U , що з'єднують всі або деякі з вершин і які називають дугами (гранями). Таким чином, і річкова мережа представляється у вигляді точок і граней, де особливим чином виділяються точки зливу річок з притоками (рис.3.8).

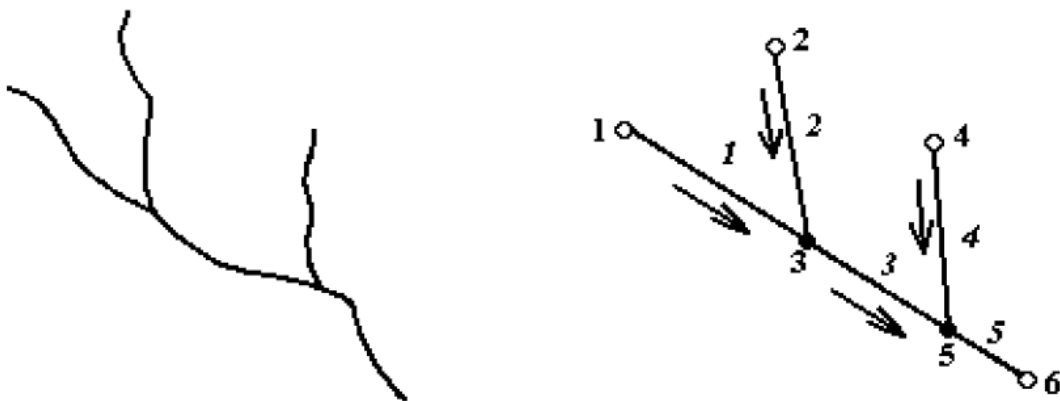


Рисунок 3.8 – Річкова мережа і її схематизація

Далі розв'язання задачі створюється матриця інцидентів (приведено приклад найпростішої річкової мережі) (рис.3.9). Матриця інцидентів (сполучень) граф – це прямокутна матриця, де по вертикалі відкладається множина вершин графа i в порядку зростання, а по горизонталі – множина граней (ребр) графа j також в порядку зростання; – елементи (коефіцієнти) матриці, визначаються наступним чином: коефіцієнт матриці $c_{ij} = 1$, якщо є дуга, що з'єднує вершину з вершиною; $c_{ij} = 0$, якщо такої дуги немає.

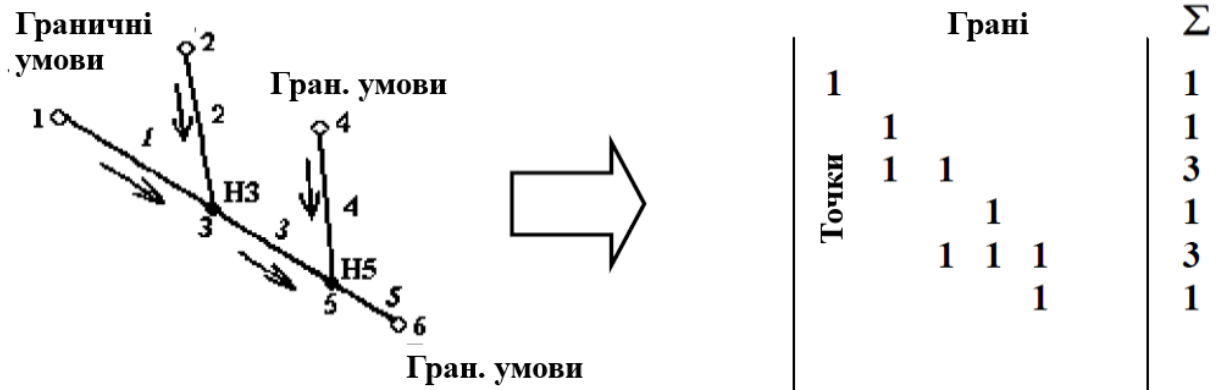


Рисунок 3.9 – Приклад річкової мережі і відповідні їй матриці

В точках зливу розташовані h -точки (глибини) або y -точки (рівні). Кожне русло представляється діагональною матрицею. Пряма прогонка починається від точки 1 вздовж потоку до злиття з допомогою рівнянь:

$$E_{j+1} = \frac{-C_j}{B_j + A_j E_j}; F_{j+1} = \frac{D_j - A_j E_j}{B_j + A_j E_j} \quad (3.10)$$

і визначаються всі коефіцієнти E і F , що використовує вираз $Q_1^{n+1} = E_1 y^{n+1} + F_1$.

Пряму прогонку переривають в місці зливу і здійснюють іншу пряму прогонку з точки 2 до зливу. На цій гілці визначають всі коефіцієнти E і F , що визначають залежність $Q_2^{n+1} = E_2 y^{n+1} + F_2$. В цих виразах визначається, що в місці зливу рівень води однаковий в усіх трьох гілках.

Крім цього, в вузлах зливу відбувається особлива обробка даних – виконується умова $\Sigma Q = 0$. Таким чином, визначаються коефіцієнти E і F для всієї мережі. Далі здійснюється перевірка особливостей точок: якщо показник дорівнює 1, точка виключається; якщо показник > 1 , знаходиться новий кінець; якщо показник дорівнює 0, розраховується значення. У випадку крайньої точки відбувається перевірка граничної умови і повернення до зворотної прогонки – від крайньої точки до місця злиття і так по всім гілкам [18].

3.3 Висновки

Суть методу краєвих різниць полягає в наступному: функції неперервних аргументів, що визначають стан потоку, замінюємо в межах досліджуваної ділянки функціями, визначеними в кінцевому числі точок сітки. Після чого, похідні замінюємо краєвими різницями. Таким чином диференціальне рівняння, що описує зміни безперервного середовища, замінюємо алгебраїчними залежностями в формі краєвих різниць. Вибір різницевої схеми визначає спосіб заміни (апроксимації) часткових похідних різницевиими співвідношеннями.

На сьогодні існує багато робіт, присвячених чисельним методам інтегрування рівняння Сен-Венана, де приведені різноманітні різницеві схеми. Виходячи з поставленої перед автором задачі, у розрахунках була використана краєво-різницева схема Еббота-Іонеску, яка описана в цьому розділі.

Схема Еббота-Іонеску коригує коефіцієнти шляхом їх осереднення між часовим рівнем $n\Delta t$ і рівнем $(n+1)\Delta t$. Для отримання достатньо точного розв'язання необхідно дві апроксимації, тобто два розв'язки лінійної системи.

Розв'язання лінійаризованої системи рівнянь (в результаті чого здійснюється послідовне наближення до вирішення нелінійної системи) здійснювалось методом подвійної прогонки. У методі подвійної прогонки для знаходження розв'язку використовується лінійна матрична структура лінійних систем рівнянь. Метод подвійної прогонки достатньо простий, ефективний і застосовується для багаторукавних русел, двовимірних моделей, при затопленні заплав.

РОЗДІЛ 4

ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НЕУСТАЛЕНОГО РУХУ ПАВОДКОВОЇ ХВИЛІ ПО ДНІСТРОВСЬКОМУ ВОДОСХОВИЩУ. ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ

Завдання розрахункових параметрів для розрахунку неусталеного руху паводкової хвилі по Дністровському водосховищу проводиться на основі наявних натурних даних [35-36].

4.1. Характеристики річки Дністер

4.1.1. Гідрологічна характеристика

Річка Дністер протікає територією України та Молдови.

Басейн річки сильно витягнутий у напрямку з північного заходу до південного сходу: його загальна довжина по осі 700 км, найбільша ширина у верхній частині – 150 км, найменша – у районі м. Могилів-Подільський – близько 50 км. Значна просторова протяжність річки та її водозбору у південно-східному напрямку визначає різноманітність природних умов басейну та, відповідно, умов живлення річки, а також особливості формування її водного режиму.

Верхів'я р. Дністер розташовані на північно-східних схилах Карпат, його середня ділянка пересікає Подільську височину та Бессарабське плато, пониззя відноситься до Причорноморської низовини.

За умов живлення та формування водного режиму р. Дністер поділяється на три частини.

1. Карпатська – до впадіння правобережної притоки – Бистриці-Надвірнянської. Площа водозбору цієї зони басейну – 15 400 км². Тут найбільш густа та багатоводна річкова мережа, найсприятливіші умови формування річкового стоку. При площі водозбору, що складає 21 % усього басейну, на цій території формується близько половини стоку усієї річки.

2. Подільська височина та Бессарабське плато – до р. Реут. Тут річковий басейн також значно порізаний багаточисельними, відносно

маловодними притоками, але які все ж дають помітне збільшення річкового стоку. На цій ділянці відчутна значна роль підземних вод у живленні річки. У цілому до впадіння р. Реут формується більше 90% стоку р. Дністер.

3. Причорноморська, низинна частина басейну – нижче р. Реут, зі слабо розвинутою річковою мережею та несприятливими умовами формування поверхневого стоку.

Створ Дністровської ГЕС контролює близько 80% стоку р. Дністер, який сформувався у найбільш обводнених його частинах: верхів'ї та середній течії. Карпатська частина басейну представляє собою низку окремих хребтів та вершин, які поступово знижуються до долини р. Дністер. Схили Карпатських гір сильно порізані вузькими, глибокими долинами річок та ущелинами. У передгір'ях річкові долини досить широкі, перемежаються з окремими вирівняними височинами. Поверхня басейну має відмітки від 1500–2000 м у горах над рівнем моря, до 400–500 м у передгір'ях.

Наявність гірського рельєфу на водозборі – основна причина формування особливостей режиму стоку р. Дністер. Циркуляційні макропроцеси у атмосфері, як механізм перерозподілу вологи по території, загострюються у Карпатах. Гірський рельєф різко впливає на атмосферні опади, сильно збільшуючи їхню кількість та інтенсивність. Карпатська частина водозбору є могутнім акумулятором атмосферної вологи та, відповідно, основною областю формування стоку річки.

Талі та дощові води слабо вбираються корінними гірськими породами та майже повністю стікають по поверхні при незначному їх переводі у підземний стік. Рельєф Подільської височини та Бессарабського плато є пагорбкуватою місцевістю, яка утворена шаровими відкладеннями, і порізана долинами річок, балками та ярами. Відмітки поверхні плато досягають від 300 до 400 м над рівнем моря.

Долини річок – приток р. Дністер мають глибини до 100–150 м.

Долина р. Дністер по всій довжині плато глибока, обрамована крутими, часто скелястими схилами. В цій зоні рельєф сприяє утворенню річкової мережі,

але забезпеченість атмосферними опадами тут набагато нижча, ніж у горах. Тож багаточисельні Подільські притоки р. Дністер досить маловодні. Низинна частина басейну (від Дубоссарської ГЕС до гирла), яка розташована у Причорноморській низовині, має спокійний, рівний рельєф степового характеру, слабо порізаний річковими долинами. Висота місцевості не перевищує 100 м над рівнем моря. Рівнинні форми рельєфу не сприяють утворенню річкової мережі та формуванню поверхового стоку.

У геологічному відношенні басейн р. Дністер характеризується великою різноманітністю. Давні докембрійські кристалічні породи: граніти, гнейси та сієніти прикриті більш пізніми силурійськими відкладеннями, які складаються, в основному, з пісковиків, глинистих сланців та вапняків. Виходи давніх порід на поверхню утворюють порожисті ділянки річища (м. Ямпіль). Скелясті береги річки, зазвичай складені з вапняків. Поверх докембрійських та силурійських порід залягають крейдові утворення. На поверхню вони виходять на ділянці річки від м. Галич до м. Кам'янка, нижче заглиблюються.

У геологічному відношенні суттєве значення мають третинні відкладення. Карпатські гори складені, в основному, цими породами – сірими пісковиками. Четвертинні відкладення представлені лесом та лесоподібним суглинком. Вони розповсюджені, в основному, у межах плато та низовини.

Сучасні алювіальні відкладення відносяться до заплавних та надзаплавних терас, їх потужність різна та не перевищує 10–12 м.

Відповідно геологічній будові найбільш забезпечена підземними водами середня частина басейну р. Дністер – у межах Подільської височини та Бессарабського плато. Багате підземне живлення річка отримує на ділянці між м. Кам'янець-Подільський (р. Смотрич) та м. Могилів-Подільський. В пониззі р. Дністер суттєво підживлюється підземними водами алювіальних відкладень. Клімат річкового басейну, який розглядається, є помірно-континентальним. Зима помірно холодна, з частими відлигами. Літо у Карпатській частині басейну дощовите з частими зливами, які іноді охоплюють практично увесь карпатський регіон водозбору р. Дністер. На рівнинній території літо спекотне, тут іноді

локально виникають зливові дощі, які у рідкісних випадках приймають катастрофічний характер.

Гірські райони басейну зайняті переважно хвойними лісами. Рівнинна територія відноситься до лісостепової та степової зон.

Середньорічна кількість опадів змінюється від 250–500 мм у лісостеповій та степовій зонах до 800–1100 мм у гірській частині басейну. Під час видатних злив в Карпатах може випадати 300 мм атмосферних опадів при значних площах одноразового зрошення.

4.1.2. Гідрографічна характеристика

Площа усього водозбору р. Дністер 72100 км², довжина 1362 км, загальне падіння 878 м.

До створу греблі Дністровського гідровузла площа водозбору річки сягає 40500 км² (56% усього водозбору), довжина річки 678 км, падіння 811 м, довжина підпірного б'єфу 194 км. Відстань від створу Дністровської ГЕС до гирла р. Дністер 677 км, від створу греблі буферного водосховища до гирла – 657 км.

До створу другого великого існуючого Дубоссарського гідровузла водозбірна площа становить 53600 км² (74 % усього басейну), довжина річки 1014 км, падіння 870 м, довжина підпірного б'єфу Дубоссарського гідровузла 128 км, падіння за природних умов ділянки від м. Кам'янка (зона виникнення підпору) до греблі Дубоссарської ГЕС – 17 м. Відстань від гирла р. Дністер до створу існуючої Дубоссарської ГЕС – 351 км. Проміжна водозбірна площа між створами Дністровської ГЕС та Дубоссарської ГЕС складає 13100 км² або 18% від площі усього басейну р. Дністер. Різноманітність кліматичних, геологічних та орографічних умов обумовлює нерівномірність розвитку річкової мережі басейн р. Дністер. Найбільш розвинута річкова мережа у Карпатах, у меншій мірі – на Поділлі, найгірше за все у Причорноморській низовині. Головні притоки р. Дністер характеризується даними таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Гідрографічні дані по основним притокам р. Дністер

Назва притоки	З якого берегу впадає	Відстань від гирла, км	Довжина L, км	Площа водозабору, F км ²
1 Стрий	правого	1177	232	3060
2 Свіча	правого	1156	106	1490
3 Ломниця	правого	1120	122	1530
4 Бистриця	правого	1104	111	2520
5 Золота Липа	лівого	1077	128	1440
6 Сірет	лівого	921	248	3900
7 Нічлава	лівого	872	82	871
8 Збруч	лівого	833	247	3330
9 Жванчик	лівого	830	107	769
10 Смотрич	лівого	782	168	1800
11 Мукша	лівого	768	56	336
12 Тернава	лівого	751	62	381
13 Студениця	лівого	732	84	477
14 Ушиця	лівого	713	122	1420
15 Калюс	лівого	684	64	390
16 Жван	лівого	671	147	570
17 Караєць	лівого	658	45	212
18 Мурафа	лівого	575	163	2410
19 Реут	правого	242	286	7760
20 Ікель	лівого	322	98	814
21 Бик	лівого	225	115	2150
22 Ботна	лівого	201	46	1540

У живленні р. Дністер основну роль відіграють верхні (карпатські) притоки: Стрий, Свіча, Бистриця, Лімниця. Нижні рівнинні притоки, незважаючи на значні площі їх водозборів, у живленні та формуванні режиму р. Дністер відіграють несуттєву роль.

Найбільші притоки, що впадають в р. Дністер на ділянці Дністровського водосховища – лівобережні, подільські: Збруч, Смотрич і Ушиця.

Із притоків р. Дністер, що впадають в зоні Дубоссарського водосховища, найбільш значним є р. Ягорлик. Дністер впадає в Дністровський лиман, який представляє собою мілководне озеро, довжиною 40 км, шириною від 4 до 12 км.

Дністровський лиман з'єднується з Чорним морем Цареградським гирлом. Самостійним елементом ландшафту басейну р. Дністер вважаються Дністровські

плавні – низовинна частина долини, та яка заливається водами р. Дністер під час паводків. Плавні займають долину р. Дністер на ділянці від м. Бендери до лиману. Їхня ширина біля м. Бендери від 0,5 до 1,5 км, біля м. Тираспіль – до 7 км. Плавні – акумулятивна низовина, яка поглинає значну кількість річних вод і наносів. Загальна площа плавнів біля 700 км², з яких 300 км² заболочено.

4.1.3. Стік за період спостережень

Зазвичай, для різних гідрологічних розрахунків необхідно мати дані по щоденному стоку та характерних витратах води (максимальних і мінімальних). Стік (середні добові та екстремальні витрати води) розраховуються за даними про щоденні рівні води. При цьому використовуються криві витрат води $Q = f(H)$, які будуються по епізодично виміряним витратам води. У період межени рівні вимірюються у два стандартних строки. У періоди проходження паводків – частіше. При динамічному руслі криві витрат води періодично уточнюються.

Регулярні спостереження за рівнями води р. Дністер розпочато о другій половині XIX сторіччя (1850-1877 р.р.). Найбільш достовірні дані про рівні є з 1895 р. (перерви припадають на час війн 1914-1918, 1941-1945 р.р.). У деяких пунктах спостережень гідропости неодноразово переносились. При відновленні гідропостів не завжди було можливо ув'язати спостереження та дані попереднього періоду.

Систематизація гідрометричних даних ускладнена територіальною розподіленістю басейну р. Дністер у минулому. Методика спостережень у різних країнах була різною. Русло р. Дністер в створах більшості гідрологічних постів є нестійким, деформації трапляються як внаслідок природних причин (розмиву та намиву ґрунту річковим потоком), так і техногенних: землечерпальних робіт та благоустрою берегів у населених пунктах.

До 1939 року витрати води вимірювались у одиничних випадках, в основному, в період межени. Усі ці обставини негативно вплинули на якість гідрометричних спостережень.

Помісячні та річні дані про середні витрати води у пункті спостережень біля м. Заліщики надані у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Середні місячні та річні витрати води р. Дністер біля м. Заліщики, F = 24600 км²

Роки	Місяці												Середнє за рік
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1895	231	182	358	888	250	257	357	278	105	142	330	137	293
1896	81,2	181	457	410	257	227	311	145	142	118	95,0	185	217
1897	81,9	140	658	603	430	672	296	181	115	475	115	68,3	320
1898	57,9	127	232	692	320	105	238	191	72,0	58,0	84,0	51,4	189
1899	93,7	128	213	352	182	208	260	156	169	214	134	138	187
1900	110	306	159	297	232	127	655	167	70,0	69,0	87,0	77,2	196
1901	41,6	53,1	362	288	206	435	323	259	274	236	185	160	235
1902	163	279	323	306	529	298	232	170	105	243	72,6	43,0	230
1903	199	256	264	190	198	467	401	209	66,0	146	165	188	237
1904	59,5	107	88,8	133	134	68,0	72,0	57,0	354	246	196	111	136
1905	50,9	52,5	178	330	256	194	139	70,0	54,0	220	272	103	160
1906	94,0	90,7	600	303	261	796	368	201	262	152	169	185	290
1907	230	131	167	839	568	236	287	129	146	59,0	66,1	74,0	244
1908	101	76,6	421	482	326	163	464	551	247	188	107	65,0	266
1909	97,2	67,9	475	652	586	192	174	70,0	89,0	70,0	102	128	225
1910	106	157	157	194	212	69,0	249	108	96,0	49,0	220	206	152
1911	104	120	368	598	238	186	248	334	225	133	100	104	230
1912	97,7	257	544	1100	499	299	255	288	658	375	331	223	409
1913	157	147	361	420	287	336	1530	1010	673	227	175	199	460
1914	133	113	310	540	508	370	420	125	125	275	94,0	179	266
1915	105	174	285	732	222	130	150	270	265	165	156	345	250
1916	258	100	330	395	250	155	340	125	95,0	220	205	115	216
1917	129	74,0	182	422	208	72,0	123	140	79,0	70,0	70,0	74,0	137
1918	206	131	143	178	98,0	72,0	112	266	230	170	358	116	173
1919	265	132	405	790	1040	520	370	325	115	75,0	192	145	365
1920	347	101	441	243	336	441	163	133	162	58,0	61,0	84,0	214
1921	160	84,0	257	180	172	480	326	70,0	86,0	45,0	129	54,6	170
1922	52,6	55	857	426	530	436	190	82,0	410	573	284	120	335
1923	149	289	454	474	198	216	254	74,0	63,0	117	132	176	216
1924	67,7	62,6	418	729	413	272	141	209	124	66,0	49,0	37,0	216
1925	29,0	114	269	216	176	261	682	370	374	172	352	227	270
1926	252	239	202	293	216	371	302	409	158	270	238	109	255
1927	162	113	371	320	206	209	202	224	766	240	204	100	260
1928	74,4	188	195	562	265	361	153	85,0	99,0	152	122	129	199
1929	54,0	58,7	231	672	264	243	544	241	147	143	123	85,0	234
1930	46,0	62,0	180	206	489	165	68,0	85,0	60,0	110	152	78,0	142
1931	45,0	44,0	210	375	194	103	60,0	159	394	295	286	66,0	186
1932	84,0	36,0	45,0	480	255	120	85,0	121	63,0	91,0	131	84,0	133
1933	28,0	46,0	203	233	376	228	859	170	300	358	305	58,0	264
1934	53,0	57,0	430	140	58,0	85,0	495	165	188	140	157	172	178
1935	40,0	46,0	435	430	360	165	175	105	130	90,0	42,0	52,0	173
1936	110	100	205	190	55,0	180	110	265	125	350	201	90,0	165
1937	47,0	84,0	408	270	170	50,0	55,0	480	145	65,0	63,0	98,0	161
1938	96,0	117	335	370	390	220	135	170	120	110	174	69,0	192
1939	134	151	100	220	250	210	85,0	105	45,0	100	171	93,0	147

1340	67,0	62,0	242	557	387	350	236	285	318	176	260	112	254
1941	121	333	570	1120	650	140	205	250	1240	250	248	271	450
1942	107	79,3	294	667	582	205	91,5	155	67,3	60,6	67,0	120	208
1943	96,4	131	132	152	141	89,5	135	50,6	56,0	41,1	81,2	64,7	97,5
1944	105	178	360	560	350	300	286	305	141	256	536	470	321
1945	80,0	92,0	566	481	342	296	200	238	108	192	114	60,0	231
1946	72,0	120	287	198	182	54,0	55,0	39,0	38,0	44,0	94,0	52,0	103
1947	13,0	16,6	637	209	100	134	82,0	69,0	243	92,0	325	188	176
1948	545	315	399	313	151	1070	793	191	83,0	95,0	70,7	57,0	340
1949	108	106	195	438	188	130	465	236	104	59,0	104	122	188
1950	68,7	264	195	234	84,0	48,0	56,0	75,0	44,0	109	156	166	125
1951	65,5	80,8	299	360	226	191	123	121	72,0	128	60,0	64,7	149
1952	88,2	124	106	912	201	146	68,0	48,0	55,0	181	170	181	190
1953	174	256	296	280	199	228	120	162	163	111	110	82,3	182
1954	45,7	36,7	315	336	256	181	102	109	58,0	83,0	68,0	95,8	141
1955	187	252	359	499	344	346	556	965	169	190	170	180	351
1956	144	63,2	105	632	311	114	142	118	96,0	71,3	61,7	144	167
1957	87,4	240	224	208	327	271	98,4	92,6	109	86,2	61,8	196	167
1958	58,0	356	207	551	325	101	128	106	285	174	146	180	218
1959	161	87,8	258	140	110	221	94,9	347	67,5	51,6	63,8	76,2	140
1960	163	134	164	165	137	252	273	197	103	159	306	236	191
1961	128	163	171	163	122	164	51,6	74,3	41,3	33,2	31,0	28,4	97,6
1962	81,3	54,6	215	830	233	340	364	161	73,2	56,1	68,5	42,4	210
1963	40,8	40,6	231	455	173	80,6	60,0	68,1	53,5	72,6	87,0	50,8	118
1964	32,9	33,6	144	806	257	71,7	218	144	230	151	162	255	209
1965	94,5	146	458	381	429	375	426	277	198	83,2	107	399	281
1966	113	545	403	273	116	230	327	317	280	97,3	366	173	270
1967	59,6	173	607	519	459	410	196	87,0	67,5	78,5	78,2	92,5	236
1968	83,3	229	366	333	134	103	120	457	451	318	156	99,1	237
1969	71,6	88,8	282	659	230	1277	400	161	116	85,5	109	84,2	297
1970	110	105	444	469	833	581	329	174	145	116	155	134	300
1971	162	189	240	186	276	135	311	120	173	123	136	265	193
1972	96,9	117	200	209	173	152	150	162	276	168	218	154	173
1973	62,4	125	287	302	343	422	354	160	88,2	86,5	95,4	101	202
1974	82,2	148	116	89,8	170	547	739	191	115	236	422	167	252
1975	214	95,7	229	416	286	646	276	381	198	185	119	114	263
1976	111	106	307	850	284	393	140	165	362	229	126	138	268
1977	86,3	374	316	350	226	241	285	161	177	100	93,5	87,6	208
1978	82,6	90,2	520	321	563	310	494	138	338	236	123	234	287
1979	268	269	498	406	267	165	221	362	123	96,9	155	172	250
1980	83,0	146	146	736	375	776	990	519	277	380	376	342	429
1981	177	286	564	262	419	236	309	305	198	220	335	297	301
1982	270	110	288	371	426	198	366	153	100	92,1	64,8	130	214
1983	126	119	263	358	245	279	221	235	104	121	64,6	77,2	184
1984	86,3	67,4	158	320	270	273	389	110	112	139	90,6	88,8	175
1985	59,4	91,6	240	409	399	357	229	145	187	102	144	247	218
1986	225	97,7	173	325	125	177	200	202	135	77,6	69,5	47,8	155
1987	35,4	72,2	155	327	242	200	80,6	81,9	94,9	113	144	224	148
1988	191	163	249	407	186	419	228	148	380	113	79,2	174	228
1989	147	111	211	223	793	391	179	212	313	144	112	251	257
1990	100	114	155	170	204	125	104	65,4	117	126	128	126	128
1991	143	65,6	119	182	451	428	323	373	149	298	242	108	240
1992	109	130	249	325	165	235	146	80,1	212	261	500	176	216
1993	148	114	325	392	186	157	315	180	407	161	146	209	228
1994	190	145	297	244	195	275	81,9	53,7	80,3	107	103	139	159
1995	139	184	247	410	276	219	157	62,7	112	85,7	148	110	179

1996	106	69,2	68,2	926	368	145	119	199	466	269	176	170	257
1997	118	202	251	361	469	385	272	322	199	243	184	297	275
1998	309	315	233	554	456	727	679	292	189	314	448	157	389
1999	235	184	726	643	301	226	245	196	155	143	113	218	282
2000	112	398	354	696	158	97,0	150	114	107	73,1	67,9	78,4	200
2001	94,0	180	455	262	150	561	486	3700	338	171	244	135	287
2002	241	416	356	308	185	267	150	237	186	294	218	97,9	246
2003	94,9	80,0	342	370	186	89,7	129	68,2	67,7	137	161	73,0	150
2004	80,6	250	338	217	169	103	92,8	569	164	182	256	200	218
2005	143	107	419	502	467	313	137	300	136	144	85,2	116	239
2006	103	76,7	292	772	274	513	248	246	160	92,2	177	95,2	254
2007	179	283	324	150	165	130	104	90,1	449	189	212	204	207
2008	159	183	324	501	325	157	974	374	352	316	130	202	333
2009	213	290	413	597	142	294	194	91,0	75,7	187	184	172	238
2010	165	125	440	348	492	769	803	236	212	129	138	316	348
2011	293	142	219	231	159	149	377	302	87,9	79,8	65,7	120	185
2012	85,4	88,6	298	290	163	220	100	138	78,8	76,5	118	88,4	145
2013	137	190	350	809	169	209	112	65,9	87,6	75,1	99,6	67,2	198
Сер.	125	149	307	422	291	278	277	207	188	158	164	142	226
Макс.	545	545	857	1120	1040	1277	1530	1010	1240	573	536	470	460
Мін.	13,0	16,6	45,0	89,8	55,0	48,0	51,6	39,0	38,0	33,2	31,0	28,4	97,5
Примітка – Жирним курсивом позначені відносні величини													

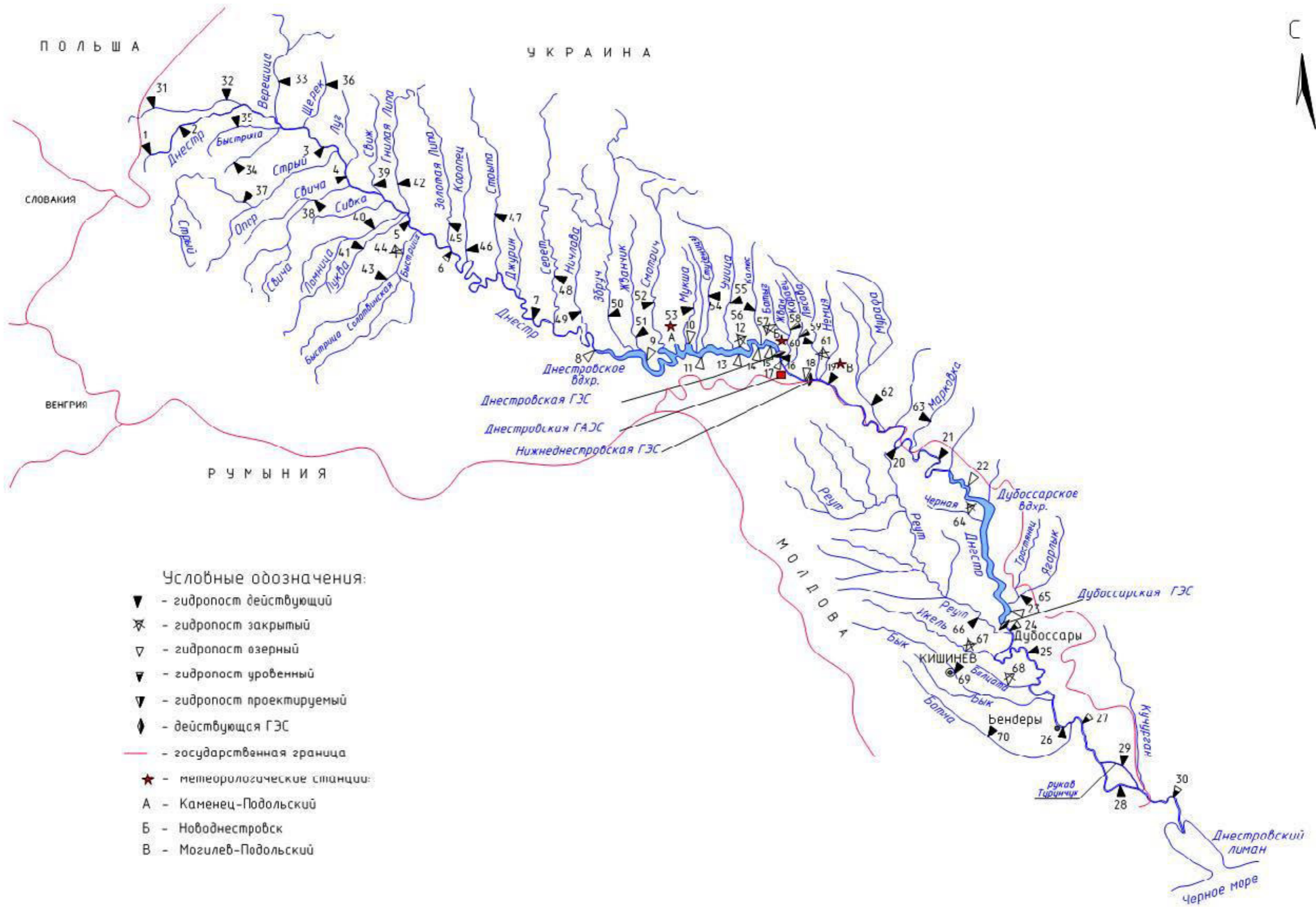


Рисунок 4.1 – Картосхема размещения пунктов гидрологических наблюдений на речках и водосховищах бассейну р. Днестр

4.1.4. Річний стік, його мінливість та внутрішньорічний розподіл

Дані щодо річного стоку на гідропостах біля м. Галич, м. Заліщики, с. Жванець, м. Могилів-Подільський, м. Кам'янка (с. Грушка) та біля м. Бендери є з 1895 р. По м. Галич та м. Заліщики спостережений стік за весь наявний період спостережень з 1895 р. по 2013 р. можна вважати умовно-природним. По гідропосту біля с. Жванець у зв'язку з його переводом з річкового в озерний за період з 1983 р. по 2013 р. фактичні дані відсутні, тому стік за цей період було відновлено по матеріалам спостережень на гідропосту біля м. Заліщики (по корелятивній залежності).

Водність річки за період спостережень має значні коливання. Дуже високі середньорічні витрати води, які сформовані переважно за рахунок літніх дощів (липень-вересень), спостерігалися у 1913, 1941 та 1980 р. р. Наприклад, стік багатоводних 1941 та 1980 років перевищив середньобагаторічний у два рази. Низький стік спостерігався у 1943, 1946, 1961 р. р., коли водність річки зменшувалася по відношенню до середньобагаторічної його величини у 2-2,2 рази. Для уявлення щодо збільшення водності по довжині (зі збільшенням площі водозбору) р. Дністер у межах рівнинної частини його басейну у таблиці 4.3 наведені відомості щодо природно-побутових середньорічних витратах води у гідрометричних створах.

У наданій таблиці побутовий річний стік за період спостережень з 1895 р. по 2013 р. близький до природного по гідропостах: біля м. Галич, м. Заліщики та с. Жванець. По гідропостах: біля м. Могилів-Подільський та м. Кам'янка (с. Грушка) стік можна вважати близьким до природного за період з 1895 р. по 1983 р. По гідропосту біля м. Бендери, де відбувається значне викривлення водного режиму господарчою діяльністю, є як побутовий, так і природний річний стік за період з 1895 р. по 2013 р.

Таблиця 4.3 – Природно-побутовий річний стік р. Дністер, м³/с

Номер року	Рік	м. Галич	м. Заліщики	с. Жванець	м. Могилів-Подільський	м. Кам'янка	м. Бендери	
		F = 14700км ²	F = 24600км ²	F = 34300км ²	F = 43000км ²	F = 49000км ²	F = 66100км ²	
побутові							побутові	природні
1	1895	172	293	316	353	370	375	375
2	1896	128	217	245	267	289	307	307
3	1897	195	320	349	375	395	414	414
4	1898	120	189	229	254	272	289	289
5	1899	114	187	206	222	244	261	261
6	1900	147	196	225	239	262	316	316
7	1901	187	235	257	279	302	322	322
8	1902	155	230	251	267	299	317	317
9	1903	186	237	265	279	307	329	329
10	1904	94,7	136	157	171	189	210	210
11	1905	117	160	181	195	215	242	242
12	1906	189	290	305	328	350	369	369
13	1907	152	244	271	297	320	342	342
14	1908	187	266	290	309	327	351	351
15	1909	155	225	255	298	323	370	370
16	1910	104	152	167	184	210	233	233
17	1911	137	230	252	271	304	324	324
18	1912	252	409	429	450	474	493	493
19	1913	291	460	477	500	520	550	550
20	1914	203	266	296	322	352	378	378
21	1915	168	250	280	315	343	388	388
22	1916	151	216	244	277	319	335	335
23	1917	87,6	137	161	191	220	251	251
24	1918	122	173	197	191	212	222	222
25	1919	255	365	400	420	455	496	496
26	1920	139	214	242	255	277	293	293
27	1921	110	170	193	209	231	248	248
28	1922	219	335	369	387	418	436	436
29	1923	126	216	244	308	334	351	351
30	1924	137	216	241	262	287	304	304
31	1925	190	270	298	315	343	362	362
32	1926	160	255	295	295	316	336	336
33	1927	217	260	302	307	335	354	354
34	1928	130	199	236	247	269	287	287
35	1929	149	234	261	275	316	349	349
36	1930	99,2	142	160	177	199	233	233
37	1931	130	186	210	226	262	308	308
38	1932	93,0	133	155	169	208	299	299
39	1933	185	264	294	310	347	384	384
40	1934	127	178	202	219	262	288	288
41	1935	126	173	200	217	253	284	284
42	1936	119	165	188	218	244	265	265
43	1937	115	161	183	226	248	270	270
44	1938	136	192	215	245	264	285	285
45	1939	105	147	167	201	221	251	251
46	1940	178	254	302	331	371	441	441
47	1941	315	450	498	532	571	592	592

Номер року	Рік	м. Галич	м. Заліщики	с. Жванець	м. Могилів-Подільський	м. Кам'янка	м. Бендери	
		F = 14700км ²	F = 24600км ²	F = 34300км ²	F = 43000км ²	F = 49000км ²	F = 66100км ²	
		побутові						побуто ві
48	1942	146	208	235	258	284	304	304
49	1943	68,3	97,5	117	136	154	164	164
50	1944	224	321	371	400	423	443	443
51	1945	162	231	272	306	331	356	356
52	1946	71,4	103	112	134	143	160	160
53	1947	135	176	193	226	243	284	284
54	1948	250	340	358	367	402	437	437
55	1949	153	188	217	233	261	284	284
56	1950	92,1	125	142	154	169	205	205
57	1951	105	149	166	185	203	226	226
58	1952	151	190	210	225	245	260	260
59	1953	145	182	195	210	230	250	250
60	1954	100	141	150	163	182	193	193
61	1955	265	351	394	418	457	447	456
62	1956	116	167	213	244	287	278	289
63	1957	116	167	186	199	223	220	225
64	1958	177	218	244	261	260	280	285
65	1959	105	140	154	169	195	209	214
66	1960	144	191	204	229	247	271	276
67	1961	63,4	97,6	116	131	155	173	179
68	1962	166	210	234	260	308	285	292
69	1963	85,0	118	133	169	195	218	226
70	1964	157	209	212	235	251	258	266
71	1965	196	281	300	333	382	385	394
72	1966	198	270	290	322	363	379	388
73	1967	163	236	259	287	306	341	352
74	1968	188	237	254	303	302	328	337
75	1969	183	297	318	377	388	487	497
76	1970	201	300	336	399	399	457	468
77	1971	134	193	229	289	296	337	348
78	1972	121	173	191	241	245	270	283
79	1973	147	202	224	261	273	298	313
80	1974	189	252	302	343	374	390	404
81	1975	183	263	299	332	353	386	401
82	1976	199	268	282	347	349	398	414
83	1977	150	208	249	281	296	325	343
84	1978	192	287	309	362	360	406	424
85	1979	174	250	279	384	355	399	418
86	1980	316	429	460	490	550	610	629
87	1981	212	301	351	402	419	466	492
88	1982	143	214	252	329	324	350	376
89	1983	139	184	196	257	251	257	276
90	1984	135	175	184	223	212	234	268
91	1985	175	218	239	243	236	268	327
92	1986	123	155	170	216	215	210	232
93	1987	117	148	162	170	174	172	222
94	1988	162	228	251	275	282	283	314
95	1989	191	257	283	283	290	286	335
96	1990	91,8	128	141	172	183	154	188

Номер року	Рік	м. Галич	м. Заліщики	с. Жванець	м. Могилів-Подільський	м. Кам'янка	м. Бендери	
		F = 14700км ²	F = 24600км ²	F = 34300км ²	F = 43000км ²	F = 49000км ²	F = 66100км ²	
побутові							побуто ві	прир одні
97	1991	169	240	264	265	285	252	309
98	1992	149	216	237	239	258		317
99	1993	141	228	251	245	275	278	341
100	1994	101	159	175	184	199	296	251
101	1995	134	179	197	213	230	214	263
102	1996	185	257	282	295	318	248	379
103	1997	200	275	303	303	327	343	397
104	1998	83	389	428	420	453	352	563
105	1999	202	282	310	342	369	488	446
106	2000	144	200	220	249	269	398	326
107	2001	216	287	316	303	327	289	414
108	2002	172	246	271	265	286	352	374
109	2003	100	150	165	175	189	308	260
110	2004	156	2181	240	205	221	203	313
111	2005	178	239	263	269	290	238	357
112	2006	183	254	280	314	339	313	399
113	2007	149	207	227	227	245	365	318
114	2008	245	333	366	385	415	264	489
115	2009	182	238	261	276	289	448	372
116	2010	254	348	383	404	436	321	516
117	2011	136	185	204	230	248	470	306
118	2012	117	145	160	172	186	267	238
119	2013	155	198	217	256	276	200	330
Середнє		159	226	251	274	296	298	334
Найбільше		316	460	498	532	571	610	629
		1980р.	1913р.	1941р.	1941р.	1941р. 0		1980р.
Найменше		63,4	97,5	112	131	143	154	160
		1961р.	1943р.	1946р.	1961р.	1946р.		1946р.

Примітка – Жирним курсивом вказані відносні величини

Дані щодо найбільших, найменших та середньобагаторічних природно-побутових витрат води за періоди наявних спостережень надані у таблиці 4.4.

На рис. 4.2 надані інтегральна та різницеві інтегральні криві природно-побутового річного стоку р. Дністер у створах біля м. Заліщики, Дністровської ГЕС (розраховано за гідрометричними даними на гідропосту біля м. Могилів-Подільський до вводу ГЕС, а після її вводу – за даними гідропоста біля м. Заліщики та бічних приток, які впадають у Дністровське водосховище). Також для співставлення наведена різницева інтегральна крива припливу по р. Дністер до Дубоссарської ГЕС (за даними служби експлуатації ГЕС). Згідно проведеному аналізу багаторічної циклічності стоку прийнятий розрахунковий ряд припливу до Дністровського водосховища можна вважати репрезентативним.

Таблиця 4.4 – Характерні величини річного природньо-побутового стоку р. Дністер в гідрометричних створах за період з 1895 р. по 2013 р. (n=119 років)

Характеристики	Гідрометричні створи					
	м. Галич	м. Заліщики	с. Жванець	м. Могилів-Подільський	м. Кам'янка	м. Бендери
1 Площа водозбору, F, км ²	14700	24600	34300	43000	49000 (48700)	66100
2 Відстань від гирла, км	1117	936	830	630	473 (509)	210
3 Характерні витрати води, Q м ³ /с:						
- найбільші	316 (1980 р.)	460 (1913 р., 1980 р.)	498 (1941 р.)	532 (1941 р.)	571 (1941 р.)	629 (1980 р.)
- найменші	63,4 (1961 р.)	97,5 (1943 р.)	112 (1946 р.)	131 (1961 р.)	143 (1946 р.)	160 (1946 р.)
4 Середні багаторічні значення:						
- витрати води, Q м ³ /с	159	226	251	274	296	334
- модуля стоку, q л/(с км ²)	10,8	9,19	7,32	6,37	6,04	5,05
- обсягу річного стоку, W км ³	5,02	7,13	7,92	8,65	9,34	10,5

У багаторічному ході стоку до 1946 року спостерігалися нетривалі маловодні періоди, які змінювались більш багатоводними. Дев'ятнадцятирічна фаза зниженої водності (з 1948 р. по 1964 р.) при $K_{\text{сер.}} = 0,80$ врівноважена таким же тривалим періодом підвищеної водності при $K_{\text{сер.}} = 1,21$ (з 1965 р. по 1981 р.). Крім того, виявлено повний цикл багаторічного коливання річного стоку з 1982 р. по 2010 р.

Тривалість наявного ряду достатня для врівноваження маловодних і багатоводних циклів та стабілізації середнього багаторічного значення стоку. Порівняння багаторічної (за увесь наявний період спостережень з 1885 р. по 2013 р.) фактичної інтегральної кривої річного стоку з її аналогом, який отримано шляхом усереднення за методом найменших квадратів, показує відсутність однобічно спрямованих тенденцій до зменшення або збільшення багаторічної водності у розрахунковому стоку (який прийнято для визначення водно-енергетичних характеристик Дністровської ГЕС). У багаторічних коливаннях стоку спостерігається циклічність, яка притаманна квазістаціонарному клімату, як головному фактору річного стоку. У

багаторічних коливаннях відсутній однобічно спрямований статистично значущий тренд (тенденція). Це є вирішальною умовою стійкості статистичних параметрів річного стоку та його водогосподарчих та водно-енергетичних похідних.

Середня квадратична помилка розрахунку середнього багаторічного значення стоку за прийнятим рядом у створі Дністровської ГЕС складає не більш ніж 3%, коефіцієнта варіації – 8% (згідно нормативним документам ці помилки не повинні бути більш ніж 10%). Дані щодо статистичних параметрів розглянутих стокових рядів та значення стоку різної на розглянутій ділянці р. Дністер та на водогосподарських ділянках наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Розрахункові значення природного річного стоку р. Дністер в розрахункових створах та на водогосподарських ділянках

Характеристика	Створ Дністровської ГЕС	Бокова приточність між Дністровською ГЕС та Дубоссарським гідровузлом (ГЕС)	Створ Дубоссарської ГЕС	Бокова приточність між Дубоссарським гідровузлом і гирлом Дністра	Гирло р. Дністер
1. Площа водозбору, F км ²	40500	13100	53600	18500	72100
2. Середній багаторічний стік:					
- витрата води Q, м ³ /с	278	31,1	309	34,9	344
- об'єм стоку W, км ³	8,77	0,98	9,75	1,10	10,9
3. Розрахунковий стік (км ³) забезпеченістю, P %:					
- 25%	10,4	1,17	11,4	0,95	12,7
- 50%	8,49	0,95	9,50	0,70	10,6
- 75%	6,82	0,75	7,80	0,50	8,68
- 95%	4,86	0,53	5,78	0,28	6,41
- 97%	4,42	0,48	5,33	0,24	5,93

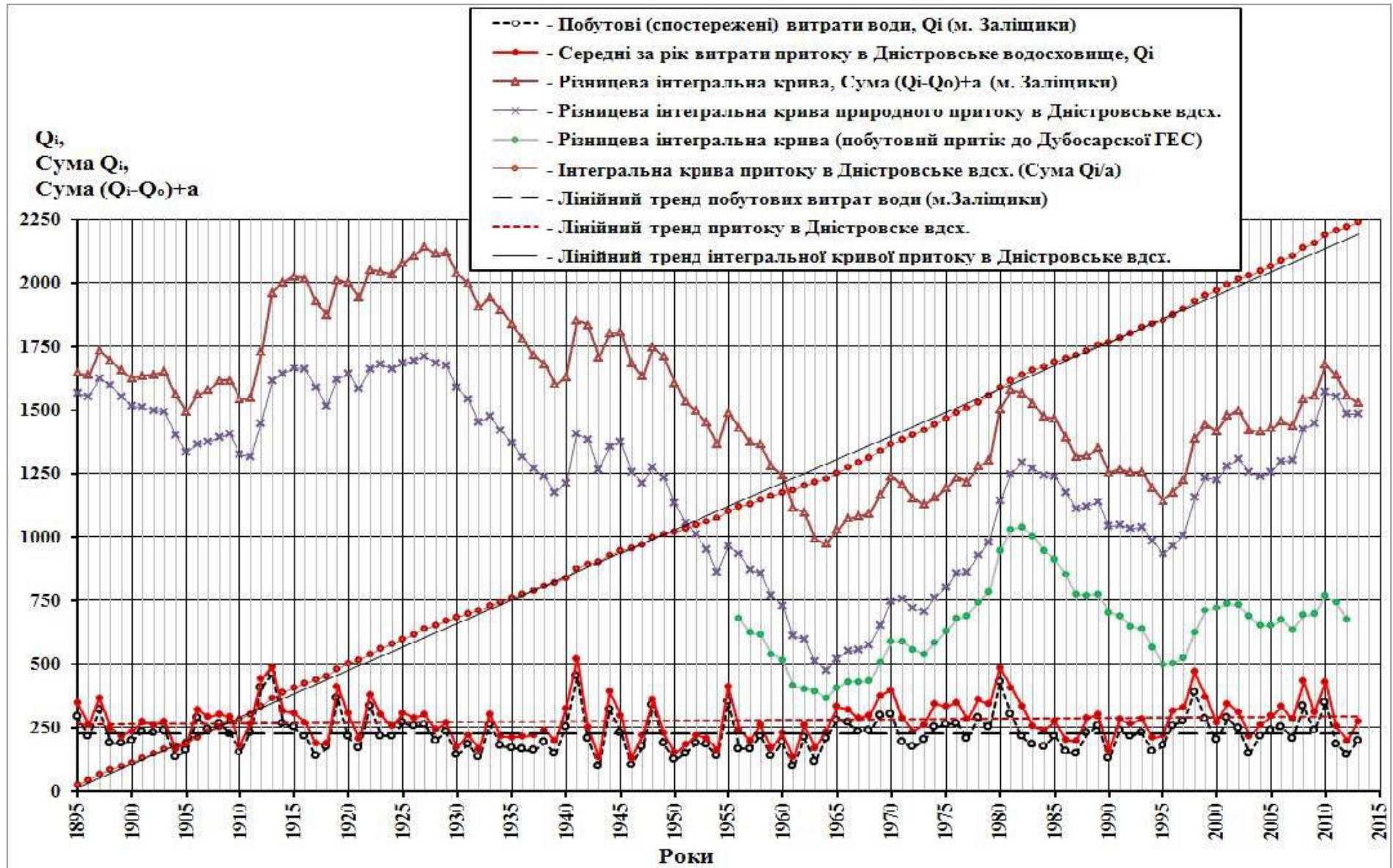


Рисунок 4.2 – Хронологічний графік річного стоку р. Дністер

Криві забезпеченостей природних середньорічних витрат води р. Дністер у створі Дністровської ГЕС наведено на рис. 4.3.

Стік у створах гідровузлів та бічний приплив між гідровузлами можна вважати умовно-природними (таблиця 4.6), тобто з видаленням багаторічного від'ємного тренду, пов'язаного з господарчою діяльністю. Розрахункові створи не співпадають з гідрометричними, де є багаточисельні дані спостережень. Перенесення у розрахункові створи (та обчислення бічної приточності) виконано з урахуванням спостережень у найближчих гідрометричних створах на основній річці та проміжних притоках-індикаторах, де також є багаторічні спостереження (з мало викривленим водним режимом).

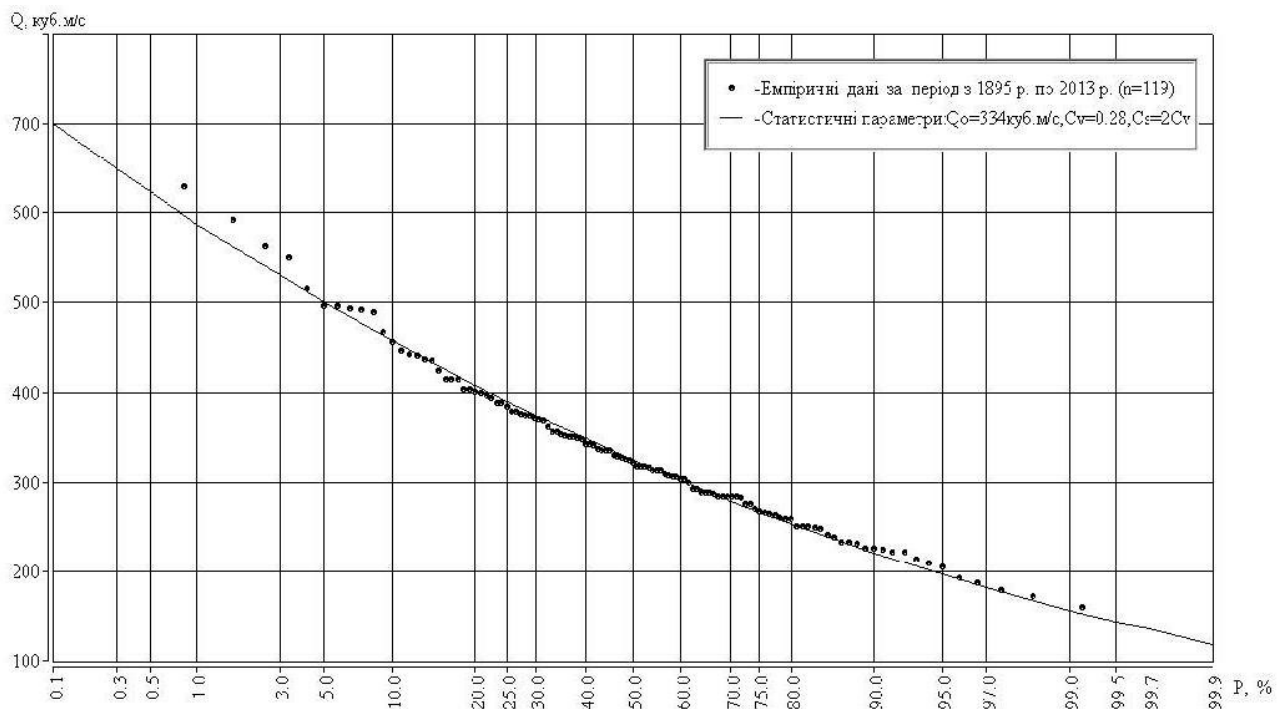


Рисунок 4.3 – Криві забезпеченості природних середньорічних витрат води притоку в Дністровське водосховище

Для контролю дані щодо норми стоку у створах Дністровського гідровузла та Дубоссарської ГЕС нанесені на графіки залежності норми природно-побутового стоку у гідрометричних створах від площ водозборів, які замикаються цими гідростворами (рис. 4.4).

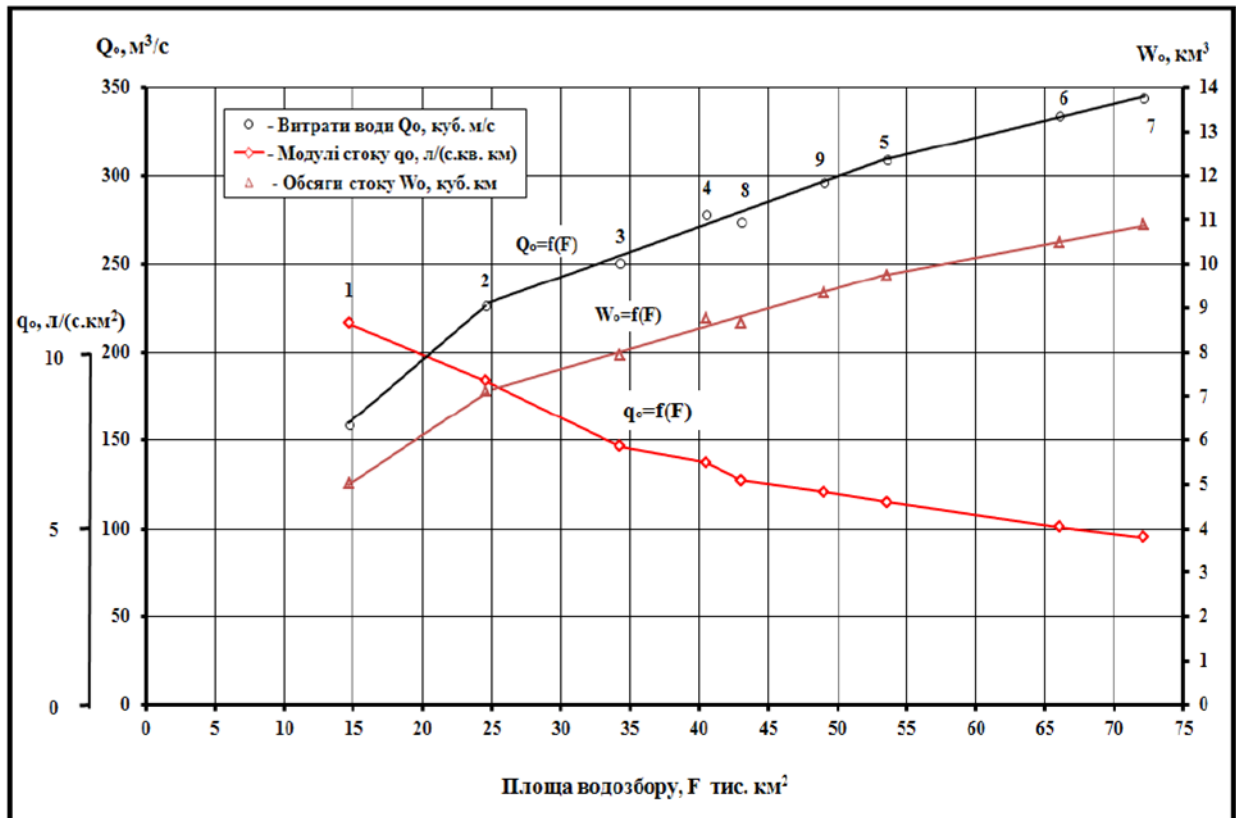


Рисунок 4.4 – Залежність норми річного стоку р. Дністер від площі водозбору

Таблиця 4.6 – Основні показники норми стоку (в побутових та природних умовах)

Номер пункту	Назва пункту	Площа водозабору F, тис. км ²	Норма стоку:		
			Q ₀ , м ³ /с	q ₀ , л/(с.км) ²	W ₀ , км ³
А. Природний стік					
1	м. Галич	14,7	159	10,8	5,02
2	м. Заліщики	24,6	226	9,19	7,13
3	с. Жванець	34,3	251	7,32	7,92
4	Дністровська ГЕС	40,5	278	6,86	8,77
5	Дубоссарська ГЕС	53,6	309	5,76	9,75
6	м. Бендери	66,1	334	5,05	10,5
7	Гирло р. Дністер	72,1	344	4,77	10,9
Б. Побутовий стік					
8	м. Могилів-Подільський	43,0	274	6,37	8,65
9	м. Кам'янка (с.Грушка)	49,0	296	6,04	9,34

Відхилення розрахункових точок від емпіричних незначні, вони пов'язані з введенням поправок на господарчу діяльність у побутовий стік в розрахункових створах. Тому можна допустити, що перенесення стокових даних у розрахункові створи зроблене в цілому вірно. Характерні значення сезонного стоку р. Дністер в створі Дністровської ГЕС за багаторічний період спостережень з 1895 р. по 2013 р. (природні умови), наведені у таблиці 4.7.

Як можна бачити за даними таблиці 4.7, розподіл річного стоку по сезонах може бути різноманітним. На весняний сезон припадає від 8 до 48 % річного стоку, на літній – від 22 до 63 %, на осінній – від 4 до 28 % та на зимовий – від 5,8 до 31 %.

Таблиця 4.7 – Характерні значення сезонного стоку р. Дністер в створі Дністровської ГЕС

Сезони	Середній за період		Найбільший за період			Найменший за період		
	км ³	%	км ³	%	рік	км ³	%	рік
Весна (03-04)	2,38	27,1	5,152	33,1	1941	0,80	22,3	1904
				47,9	1963		8,19	1974
Літо (05-09)	3,93	44,8	10,16	63,3	1913	1,080	30,3	1950
				63,3	1913		21,9	1947
Осінь (10-11)	1,04	11,9	2,566	16,0	1922	0,24	6,60	1961
				27,7	1936		4,33	1969
Зима (12-02)	1,425	16,2	2,973	18,5	1997 – 98	0,47	13,1	1946 – 47
				31,4	1947 – 48		5,78	1933 – 34
Межень (05-02)	6,395	72,9	13,171	82,0	1980 – 81	2,32	64,7	1946 – 47
				91,8	1974 – 75		52,1	1963 – 64
Примітка – В чисельнику вказана доля в % відповідна характерній абсолютній величині, в знаменнику вказана характерна відносна величина в %.								

Параметри сезонного стоку у створах Дністровської ГЕС і його розрахункові значення різної забезпеченості наведені у таблиці 4.8.

Моделі внутрішньорічного розподілу природного стоку р. Дністер у створі Дністровської ГЕС, які отримані з врахуванням спостережень у гідрометричних створах, наведені у таблиці 4.9. Реальний розподіл стоку для розрахунку за характерні роки підібрано за ознакою приблизно однакової забезпеченості за рік, лімітуючий період (межень: травень-грудень), лімітуючий сезон (зима: грудень-лютий).

Таблиця 4.8 – Параметри стоку р. Дністер в створі Дністровської ГЕС

Сезони	Середнє багаторічне значення, м ³ /с (км ³)	Коефіцієнти		Розрахункові значення м ³ /с (км ³), забезпеченістю:				
		варіації C _v	асиметрії C _s	P=25%	P=50%	P=75%	P=95%	P=97%
<i>Створ Дністровської ГЕС (F = 40500 км²)</i>								
Весна (березень-квітень)	452 (2,38)	0,38	2C _v	550 (2,90)	429 (2,26)	326 (1,72)	2,13 (1,12)	188 (0,99)
Літньо-осінній (травень-листопад)	296 (4,97)	0,38	3C _v	323 (5,97)	251 (4,65)	196 (3,62)	136 (2,52)	125 (2,31)
Межень (травень-лютий)	243 (6,395)	0,36	2C _v	295 (7,74)	233 (6,12)	180 (4,72)	120 (3,16)	108 (2,83)
Зима (грудень-лютий)	183 (1,425)	0,40	2C _v	225 (1,75)	174 (1,35)	130 (1,01)	82,3 (0,64)	72,0 (0,56)

Таблиця 4.9 – Внутрішньорічний розподіл стоку характерних за водністю років р. Дністер в створі Дністровської ГЕС

Одиниці виміру	Місяці												Весна 03-04	Літо- осінь 05-11	Зима 12-02	Середнє за рік	Сума за рік
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II					
Середньо-багатоводний 1914-1915 рік (P=25%)																	
Q, м ³ /с	407	655	561	413	503	164	145	322	139	203	169	265	-	-	-	329	-
W, км ³	1,09	1,70	1,50	1,07	1,35	0,44	0,38	0,86	0,36	0,54	0,45	0,65	-	-	-	-	10,4
%	10,50	16,33	14,49	10,30	13,97	4,24	3,61	8,30	3,46	5,22	4,35	6,23	26,8	57,4	15,8	-	100
Середній багаторічний розподіл																	
Q, м ³ /с	396	508	347	327	329	250	231	189	206	183	169	197	-	-	-	278	-
W, км ³	1,06	1,32	0,93	0,85	0,88	0,67	0,60	0,51	0,53	0,49	0,45	0,48	-	-	-	-	8,77
%	12,10	15,01	10,61	9,66	10,06	7,64	6,82	5,78	6,09	5,59	5,16	5,48	27,1	56,7	16,2	-	100
Середньо-маловодний 2012-2013 рік (P=75%)																	
Q, м ³ /с	378	361	223	290	148	184	124	132	175	140	185	250	-	-	-	216	-
W, км ³	1,01	0,94	0,60	0,75	0,40	0,49	0,32	0,35	0,45	0,48	-	-	-	-	-	-	8,77
%	14,89	13,76	8,79	11,05	5,84	7,26	4,73	5,21	6,67	5,52	7,30	8,98	28,7	49,5	21,8	-	100
Маловодний 1990-1991 рік (P=95%)																	
Q, м ³ /с	183	195	238	143	133	89,7	142	149	154	152	167	96,6	-	-	-	154	-
W, км ³	0,49	0,50	0,64	0,37	0,35	0,24	0,37	0,40	0,40	0,41	0,45	0,24	-	-	-	-	4,86
%	10,10	10,40	13,13	7,63	7,34	4,95	7,57	8,22	8,21	8,39	9,21	4,85	20,5	57,0	22,5	-	100
Дуже маловодний 1950 – 1951 рік (P=97%)																	
Q, м ³ /с	251	282	120	64,4	80,0	95,1	64,3	113	197	199	98,1	111	-	-	-	140	-
W, км ³	0,67	0,73	0,32	0,17	0,22	0,26	0,17	0,30	0,51	0,53	0,26	0,27	-	-	-	-	4,41
%	15,26	16,57	7,30	3,78	4,86	5,78	3,78	6,87	11,58	12,10	5,97	6,15	31,8	44,0	24,2	-	100

4.1.5. Максимальний стік р. Дністер, розрахункові гідрографи

Максимальні витрати води р. Дністер спостерігаються у теплий період року від злив та під час весняних водопіль, які формуються за рахунок талих та зливно-дощових вод. Крім того, можливі паводки змішаного походження з високими максимальними витратами води і у зимовий період під час відлиг. Таким чином, згідно кліматичним особливостям басейну р. Дністер поява максимальних (найбільших у році) витрат води у річці є можливою в будь-яку пору року.

Із загального ряду спостережень з 1881 р. по 2013 р. приблизно половина річних максимумів формується зливовими водами. Найбільший максимум за період спостережень був зливого походження на початку вересня 1941 р. під час бойових дій, коли роботи на гідропостах не проводилися. Відмітки вищих рівнів 1941 року визначені пізніше шляхом нівелювання міток паводку, а максимальні витрати розраховані гідравлічно.

З 1998 р. та 2008 р. під час проходження високих зливно-дощових паводків амплітуда коливань рівнів висвітлена вимірами витрат води на гідропосту біля м. Заліщики майже на 90 %.

Весняне водопілля на р. Дністер обумовлене наявністю щорічного снігового покриву у гірській частині басейну та на Подільській височині. Зазвичай, водопілля проходить кількома хвилями, які формують пилкоподібні гідрографи. Часто водопілля посилюється весняними дощами, у таких випадках останні піки можуть перевершити перші. Максимальні рівні викривляються заторами та зажорами. В ряді випадків дати максимальних рівнів не узгоджуються між окремими пунктами спостережень, а максимальні витрати на ці дати (з урахуванням пробігу води) не ув'язуються по довжині річки.

Середні строки початку водопілля випадають на третю декаду лютого, ранні – на перші числа січня, пізні – наприкінці березня.

Найвищі рівні водопілля проходять, зазвичай, наприкінці другої декади березня. У теплі весни – у середині лютого, а у багатосніжні холодні та довготривалі весни – у другій декаді квітня. Закінчується весняне водопілля наприкінці квітня, іноді на початку травня.

Середня тривалість основної хвилі 30 діб, найменша 15, найбільша – до 50 діб. Основна область формування стоку водопіль – верхня частина басейну (гірські райони та Подільська височина). Тому в окремі роки на середній та нижній ділянках р. Дністер може траплятися помітне розпластування водопільних хвиль та зниження максимуму, але частими є випадки надходження талого стоку з усього водозбору та, взагалі, переважає тенденція до збільшення максимальних витрат по довжині річки.

Дані щодо максимального стоку використані з 1881 р. (в основному, у обробці Укргідропроєкту та, частково, Гідрометричної служби України).

Статистичні параметри максимальних витрат води та сумарного стоку весняних водопіль визначалися різними методами:

- моментів з урахуванням зсуення коефіцієнтів варіації та асиметрії;
- найбільшої правдоподібності;
- найменших квадратів.

У якості розрахункової прийнято функцію розподілу забезпеченостей Крицького-Менкеля (трьохпараметричний гамма - розподіл).

Дані про прийняті статистичні параметри та розрахункові значення максимальних витрат води та об'ємів стоку весняних водопіль надані у таблиці 4.10.

Розрахункові значення та криві забезпеченості максимальних витрат води весняного водопілля лівобережних приток р. Дністер, що впадають в Дністровське водосховище наведені у таблиці 4.11 та 4.12.

Криві забезпеченості максимальних витрат води наведені на рис.4.5.

Криві забезпеченості сумарного стоку весняних водопіль наведені на рис.4.6.

Таблиця 4.10 – Максимальний стік весняного водопілля р. Дністер в гідрометричних та розрахунковому створі

Створ	Площа водозбору, км ²	Період спостережень (роки)	Параметри			Максимальний стік, забезпеченістю Р %:										
			Середнє багаторічне значення	Коефіцієнти		0,01 з гар.по пр.	0,01	0,1	0,3	0,5	1	5	10	25	50	
				варіації, C _v	асиметрії, C _s											
1 Параметри і розрахункові значення максимальних витрат води (м³/с)																
м. Галич	14 700	1881-2013, n=133	857	0,52	4C _v	6050	5350	3710	3060	2780	2430	1690	1410	1040	755	
м. Заліщики	24 600	1881-2013, n=133	1170	0,54	4C _v	8720	7700	5290	4330	3920	3410	2350	1940	1420	1020	
м. Жванець	34 300	1881-2013, n=133	1260	0,53	4C _v	9130	8070	5570	4570	4150	3620	2510	2080	1530	1100	
Створ Дністровського гідровузла	40 500	-	-	-	-	9400	8340	5760	4730	4290	3740	2590	2150	1585	1145	
М. Могилів-Подільський	43 000	1881-2013, n=133	1320	0,53	4C _v	9580	8470	5850	4800	4350	3800	2630	2180	1610	1160	
м. Кам'янка	49 000	1881-2013, n=133	1385	0,51	4C _v	9510	8420	5870	4850	4410	3870	2710	2260	1680	1220	
2 Параметри і розрахункові значення сумарного стоку (км³)																
м. Галич	14 700	1881-2013, n=133	1,34	0,45	2C _v	-	4,82	4,01	3,60	3,40	3,14	2,47	2,16	1,69	1,25	
м. Заліщики	24 600	1881-2013, n=133	1,66	0,47	2C _v	-	6,21	5,14	4,6	4,34	3,99	3,12	2,71	2,10	1,54	
с. Жванець	34 300	1881-2013, n=133	1,91	0,47	2C _v	-	7,16	5,93	5,30	5,00	4,60	3,59	3,12	2,42	1,77	
Створ Дністровського гідровузла	40 500	-	-	-	-	-	7,87	6,51	5,82	5,49	5,05	3,95	3,42	2,66	1,95	
м. Могилів-Подільський	43 000	1881-2013, n=133	2,17	0,47	2C _v	-	8,11	6,71	6,00	5,66	5,21	4,07	3,53	2,74	2,01	
м. Кам'янка	49 000	1881-2013, n=133	2,36	0,47	2C _v	-	8,84	7,31	6,54	6,17	5,67	4,43	3,85	2,98	2,19	

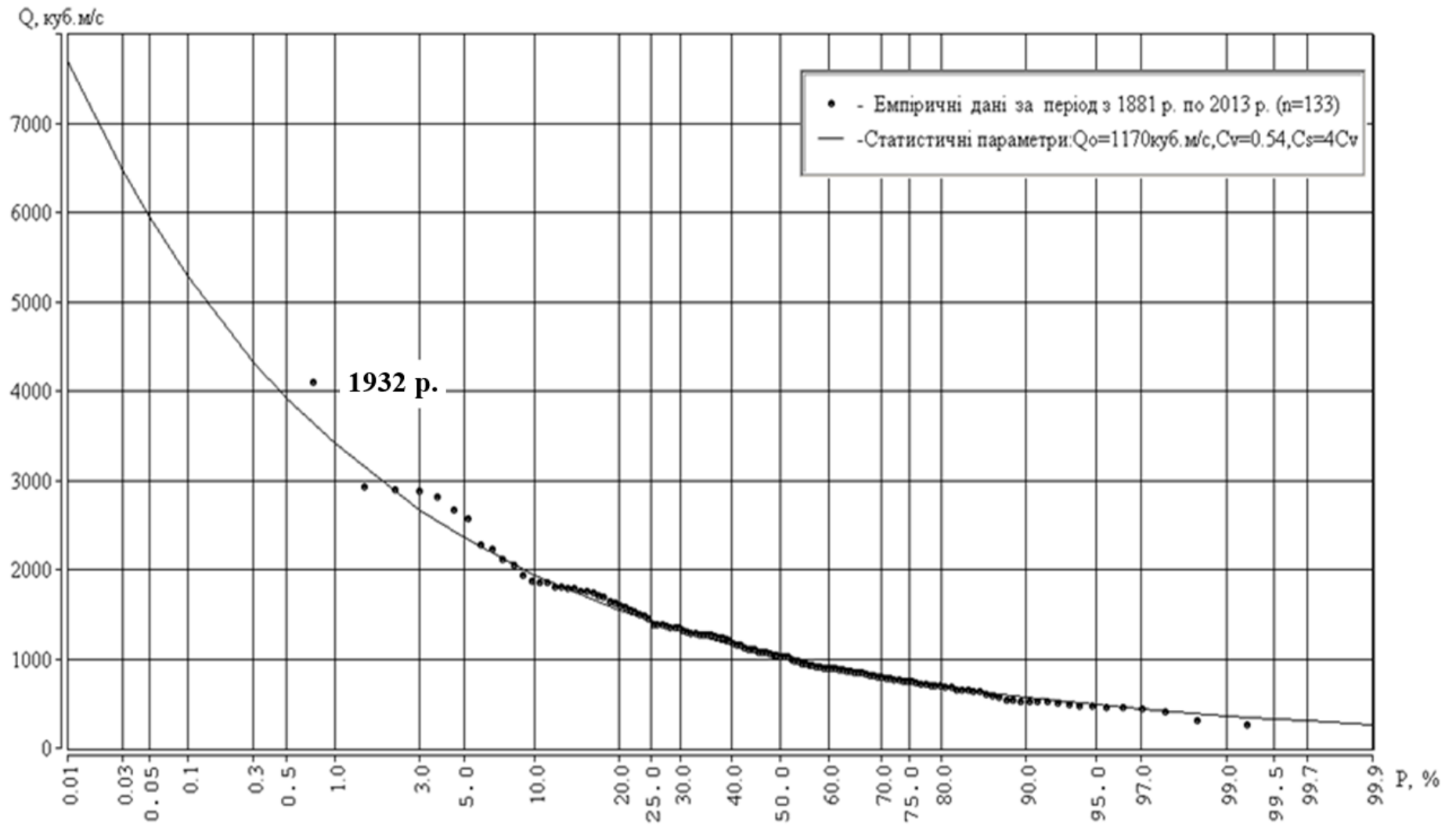


Рисунок 4.5 – Криві забезпеченостей максимальних витрат води весняного водопілля р. Дністер – гідропост м. Заліщики

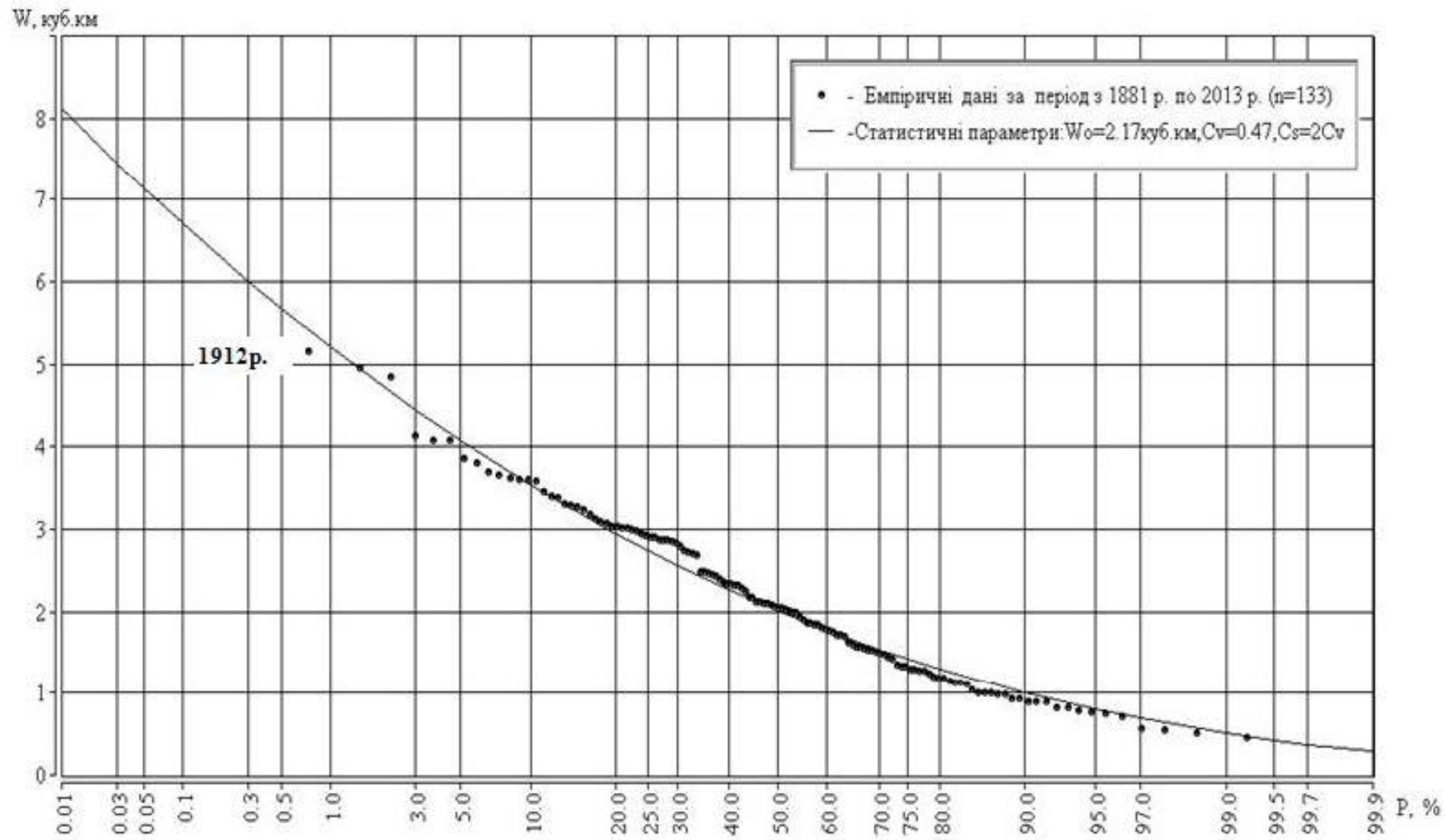


Рисунок 4.6 – Криві забезпеченостей сумарного стоку води весняного водопілля р. Дністер – гідропост м. Заліщики

Таблиця 4.11 – Параметри та розрахункові значення максимальних витрат води весняного водопілля різної забезпеченості

Річка	Пункт спостережень	Площа водозбору F, км ²	Період спостережень (роки)	Параметри			Максимальний стік, забезпеченістю P %:						
				Середня багаторічна витрата води, м3/с	Коефіцієнти		0,5	1	2	3	5	10	25
					варіації, C _v	асиметрії, C _s							
1 Нічлава	с. Стрілковці	584	1955-2013, n=54	11,4	1,05	3C _v	70,3	58,3	52,0	41,1	33,9	25,0	14,7
1.1 Нічлава	гирло	871	-	15,4	-	-	94,9	78,7	70,2	55,5	45,8	33,8	19,8
2 Збруч	с. Завалля	3240	1972-2013, n=40	48,6	0,77	3C _v	217	186	165	140	120	94,3	62,2
2.1 Збруч	гирло	3330	-	49,6	-	-	221	190	168	143	122	96,2	63,4
3 Жванчик	с. Ластівці	703	1954-2013 n=59	15,6	1,20	3C _v	111	90,4	80,0	62,1	50,3	35,9	19,8
3.1 Жванчик	гирло	769	-	16,7	-	-	119	96,7	85,6	66,4	53,8	38,4	21,2
4 Смотрич	с. Цибулівка	1790	1931-2013, n=79	57,8	1,30	3C _v	448	362	300	243	195	136	72,3
4.1 Смотрич	гирло	1800	-	58,0	-	-	450	363	301	244	196	137	72,6
5 Мукша	с. Мала Слободка	302	1954-2013, n=52	7,15	1,21	3C _v	51,2	41,7	36,0	28,6	23,1	16,5	9,07
5.1 Мукша	гирло	336	-	7,72	-	-	55,3	45,0	38,9	30,9	24,9	17,8	9,80
6 Студениця	с. Голозубинці	296	1971-2013 n=37	10,2	-	-	112,5	88,0	66,0	52,5	38,0	23,5	11,5
6.1 Студениця	гирло	477	-	14,6	-	-	161	126	34,4	75,1	54,3	33,6	16,4
7 Ущиця	с. Тимків	1150	1972-2013 N=37	50,3	1,27	3C _v	380	307	250	208	167	118	63,1
7.1 Ущиця	гирло	1420	-	58,9	-	-	445	359	293	244	196	138	73,9
8 Калюс	Смт Нова Ущиця	259	1951-2013 n=55	19,6	-	-	111	104	95,0	89,0	80,5	65,8	25,0
8.1 Калюс	гирло	390	-	26,6	-	-	151	141	129	121	109	89,5	34,0
9 Батіг	с. Заміхів	94,1	1947-1988 n=42	22,5	0,77	3C _v	83,8	76,1	70,0	63,0	56,4	46,6	32,0

Таблиця 4.12 – Параметри та розрахункові значення максимальних витрат води зливово-дощових паводків різної забезпеченості

Річка	Пункт спостережень	Площа водозбору, $F \text{ м}^2$	Період спостережень за стоком (роки)	Середне-багаторічна витрата води $Q_{0max}, \text{м}^3/\text{с}$	Коефіцієнти		Розрахункові значення $Q_{max} (\text{м}^3/\text{с})$, забезпеченістю $P\%$						
					Варіації, C_v	Асиметрії, C_A	0,5	1	2	3	5	10	25
1. Нічлава	с.Стрілковці	584	1955-2013 (n=59)	10,3	2,0	$3C_v$	139	107	80,0	63,9	43,3	20,8	7,22
1.1 Нічлава	гирло	871	-	12,6	-	-	170	131	97,7	80,0	52,8	25,4	8,81
2.Збруч	с.Завалля	3240	1971-2013 (n=42)	32,0	0,70	$6C_v$	140	116	95,0	83,3	70,5	55,4	38,4
2.1 Збруч	гирло	3330	-	32,5	-	-	142	118	96,3	84,4	71,5	56,2	38,9
3. Жванчик	с.Ластівці	703	1930-1939, 1954-2013 (n=64)	11,7	1,95	$6C_v$	137	101	75,0	57,9	43,3	27,2	12,5
3.1 Жванчик	гирло	769	-	12,2	-	-	143	106	78,4	60,6	45,0	28,5	13,1
4.Смотрич	с.Цибулівка	1790	1931-2013 (n=79)	20,9	0,97	$3C_v$	121	102	85,0	74,8	61,2	44,3	25,0
4.1Смотрич	гирло	1800	-	21,0	-	-	121	102	85,2	75,0	61,4	44,4	25,1
5. Мукша	с.Мала Слободка	302	1954-2013 (n=52)	7,39	2,0	$4C_v$	101	77,0	60,0	45,8	29,9	13,6	5,17
5.1 Мукша	гирло	336	-	7,79	-	-	107	81,2	63,3	48,3	31,5	14,3	5,45
6. Студениця	с.Голозубинці	296	1971-2013 (n=43)	8,33	1,85	-	166	71,4	60,0	42,4	31,8	20,2	9,08
6.1Студениця	гирло	477	-	10,6	-	-	211	90,7	76,2	53,8	40,4	25,7	11,5
7.Ушиця	с.Тимків	1150	1972-2013 (n=62)	25,4	-	-	113	110	98,0	90,0	79,0	63,0	35,0
7.1Ушиця	гирло	1420	-	28,2	-	-	132	129	115	105	92,4	73,7	41,0
8. Калюс*	Смт Нова Ушниця	259	1951-2013 (n=55)	13,9	-	-	149	133	116	104	86,0	55,0	7,50
8.1 Калюс	гирло	390	-	17,1	-	-	183	164	143	128	106	67,7	9,23
9. Батіг (пр. притока р.Жван)	с.Заміхів	94,1	1947-2013 (n=42)	30,4	2,0	$4C_v$	373	279	230	162	120	74,4	31,9

Примітка -* -Розрахункові значення витрат води по сумарним інтервальним кривим забезпеченостей

Гідрографи весняних водопіль

Розрахункові гідрографи весняних водопіль побудовані в створі Дністровського гідровузла рівнозабезпеченими по максимальним витратам та об'ємам сумарного стоку водопіль по моделі спостереженого в 1909 р. водопілля річки Дністер в створі гідропосту біля м. Могилів - Подільський.

Гідрограф водопілля 1909 р. має найбільш повну однопікову форму з усіх спостережених високих водопіль. Найбільша витрата і відповідний об'єм мають рідку емпіричну повторюваність ($P = 3\%$ та $6,7\%$ відповідно).

Гідрографи різної забезпеченості та їх координати представлені на рис. 4.7.

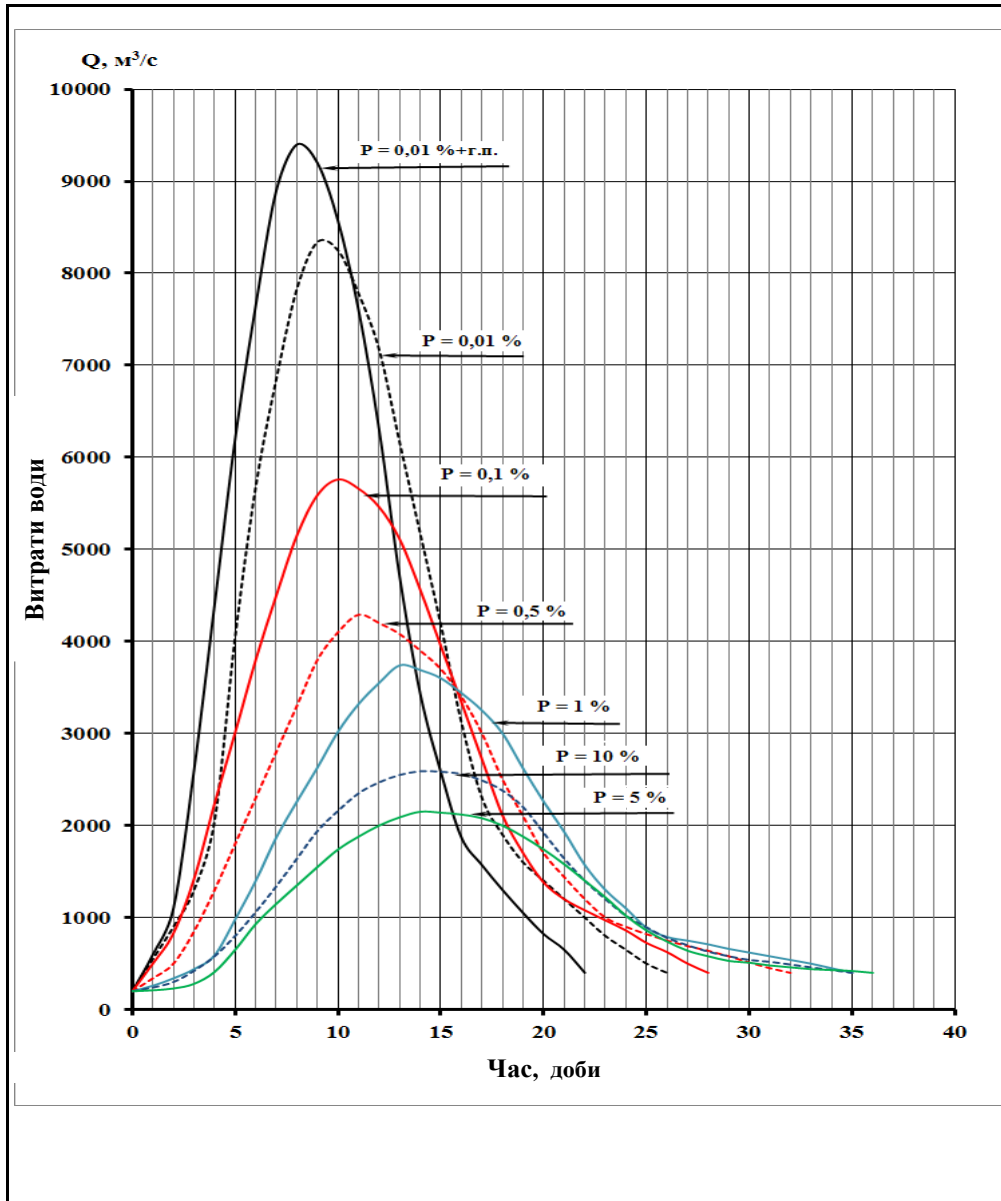
Зливно-дощові паводки

У теплу пору року на р. Дністер спостерігаються високі паводки, які за максимальною витратою в більшості випадків перевищують весняні водопілля. Формування цих паводків обумовлено частим випаданням великої кількості атмосферних опадів переважно зливого характеру у гірській частині басейну, яка відрізняється сприятливими умовами для утворення поверхневого стоку.

За даними спостережень з 1881 р. високі паводки з витратами води більш ніж $2,0$ тис. $\text{м}^3/\text{с}$ проходили у зоні Дністровського водосховища до тридцяти разів. Найбільш високим за наявний період спостережень був паводок на початку вересня 1941 р. Його максимум біля гідропосту Заліщики (вхідний створ для Дністровського водосховища) досягав $8040 \text{ м}^3/\text{с}$. Найменший зливовий максимум – $304 \text{ м}^3/\text{с}$ спостерігався у 1961 році. Дощові паводки на р. Дністер характеризуються інтенсивним ходом стоку. Зазвичай, тривалість під'йому коливається у межах від 20 до 30 годин, спад проходить у 1,5–2 рази довше. Збільшення витрат під час підйому досягає від 1000 до $1500 \text{ м}^3/\text{с}$ за 12 годин при передпаводковій витраті від 100 до $200 \text{ м}^3/\text{с}$.

За один теплий період може пройти декілька інтенсивних паводків.

З видатними максимальними витратами води, зазвичай, пов'язані об'єми сумарного стоку рідкої повторюваності.



Час, доби	Ординати гідрографів Q м³/с, забезпеченістю P %:						
	0,01 +г.п.	0,01	0,1	0,5	1	5	10
0	200	200	200	200	200	200	200
1	600	550	500	340	260	240	210
2	1100	900	830	500	340	300	230
3	2600	1300	1420	850	440	420	280
4	4400	2050	2240	1300	590	580	410
5	6200	4050	3010	1800	980	800	650
6	7650	5680	3800	2300	1400	1060	930
7	8900	6850	4500	2800	1870	1340	1150
8	9400	7830	5150	3300	2260	1640	1350
9	9200	8340	5590	3800	2630	1940	1550
10	8570	8250	5760	4100	3020	2160	1740
11	7600	7780	5660	4290	3320	2350	1880
12	6300	7170	5460	4200	3550	2470	2000
13	4700	6160	5110	4080	3740	2550	2090
14	3430	5170	4560	3900	3690	2590	2150
15	2580	4180	3950	3700	3600	2585	2140
16	1870	3120	3340	3400	3440	2560	2120
17	1570	2300	2720	3000	3250	2490	2080
18	1300	1900	2110	2500	3000	2380	2000
19	1050	1600	1700	2100	2620	2200	1880
20	820	1400	1380	1700	2260	1920	1740
21	650	1200	1200	1440	1930	1640	1580
22	400	1000	1080	1200	1570	1400	1400
23	-	800	970	1000	1300	1200	1220
24	-	650	860	900	1100	1020	1020
25	-	500	725	820	890	895	860
26	-	400	625	750	790	780	740
27	-	-	500	690	750	700	640
28	-	-	400	640	710	630	580
29	-	-	-	580	660	580	530
30	-	-	-	512	620	540	510
31	-	-	-	450	580	520	480
32	-	-	-	400	540	490	460
33	-	-	-	-	500	460	440
34	-	-	-	-	450	430	430
35	-	-	-	-	400	400	420
36	-	-	-	-	-	-	400
W, км³	7,87	7,87	6,51	5,49	5,05	3,95	3,42

Рисунок 4.7 – Гідрографи весняних водопіль різних забезпеченостей р. Дністер в створі Дністровської ГЕС

Як вже відзначалося, основною зоною формування дощових паводків у басейні р. Дністер є водозбори його правих приток, розташовані на північно-східних схилах Карпат (Стрий з притокою Опір, Свіча, Лімниця, Бистриця).

Дощові паводки, що формуються у верхів'ях р. Дністер по мірі виходу на рівнину зазнають суттєвого розпластування. Зазвичай, до гідропосту біля м. Заліщики, розташованого у вхідному створі Дністровського водосховища, максимальні витрати збільшуються, а нижче зменшуються. Такий характер зміни витрат по довжині річки є типовим при проходженні високих паводків, що сформувались за рахунок інтенсивних дощів у гірській частині басейну.

Іноді майже весь басейн може бути охопленим тривалими дощами. За подібний збіг обставин максимальні витрати води вниз по течії річки збільшуються до створу Дубоссарської ГЕС (побудована у 1955 р.). Але, взагалі, нижче гідропосту біля м. Заліщики переважає тенденція зниження максимуму по довжині середньої та нижньої течії річки за рахунок природної трансформації паводкової хвилі. Така особливість притаманна видатним паводкам, які формуються під дією гірських злив, що випадають вкрай інтенсивно та рясно і зрошують значно більші площі водозбору у горах, ніж на рівнині.

У розрахунках враховані максимальні витрати води зливово - дощових паводків, відповідних по довжині річки.

Криві забезпеченостей максимальних витрат води та об'ємів сумарного стоку зливодощових паводків наведені на рис. 4.8-4.9.

У разі визначення величин емпіричної забезпеченості видатних паводків 1941 р., 1969 р. та 2008 р., наприклад, по гідропосту біля м. Заліщики відповідно наявному 133-річному хронологічному ряду, точки цих трьох років, які відповідають спостереженням, не узгоджуються з тенденцією напрямку аналітичної кривої забезпеченості, що визначена за сукупністю максимальних витрат води, що розглядаються. Емпіричні точки 1941 р., 1969 р. та 2008 р. як би "випадають" з наявного ряду спостережень. Тобто, максимуми 1941 р., 1969 р. та 2008 р. повинні бути на чолі більш тривалого ранжируваного ряду, ніж 133-річного, що є в наявності.



Рисунок 4.8 – Криві забезпеченостей максимальних витрат зливо-дощових паводків р. Дністер – гідропост біля м.

Заліщики

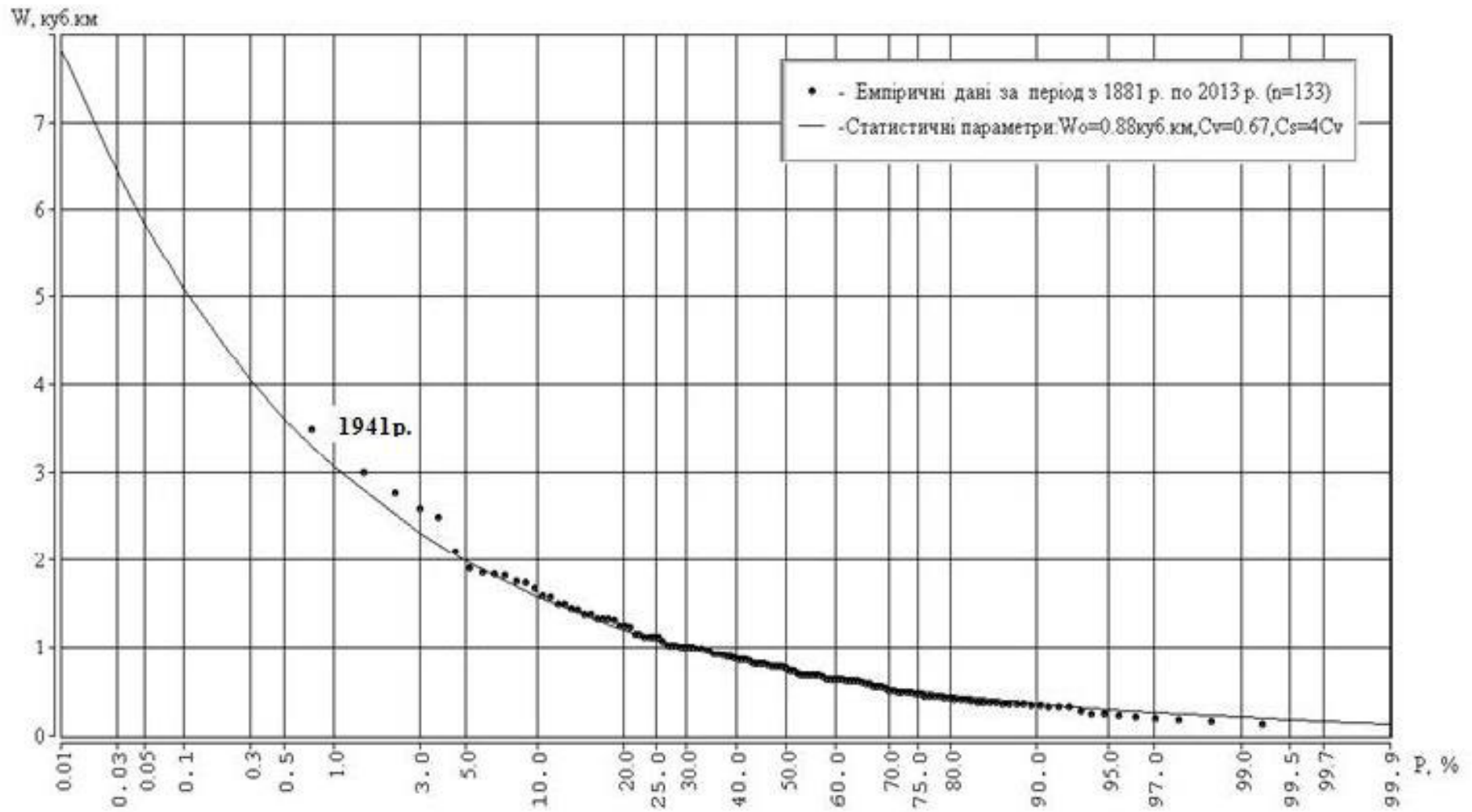


Рисунок 4.9 – Криві забезпеченостей сумарного стоку зливо-дощових паводків р. Дністер – гідропост біля м. Заліщики

У ці три роки формування зливого стоку проходило при особливо інтенсивному протіканні гідрологічних процесів та накладенні супутніх явищ, які рідко зустрічається. Ці явища сприятливо впливають на стікання у руслову мережу атмосферних опадів, що випали "обвальню".

Гідрографи зливо-дощових паводків

У якості розрахункових витрат при проектуванні Дністровського гідровузла прийняті максимальні витрати води зливого-дощових паводків. Розрахункові припливні (прийняті у якості ретрансформованих) максимуми визначені за даними гідропосту біля м. Заліщики, що знаходиться трохи вище зони виклинювання водосховища. Розрахункові гідрографи зливо-дощових паводків побудовані за рівнозабезпеченими значеннями максимальних витрат води (г.п. Заліщики) та об'ємів паводкового стоку (дані щодо об'ємів враховано для створу Дністровського гідровузла). Форма розрахункових гідрографів прийнята найбільш несприятливою для роботи водоскидних споруд за моделлю гідрографа видатного паводку, що спостерігався у 1969 р. (рис. 4.10).

Гідрографи різних забезпеченостей та їхні координати наведені на рис 4.11.

На рис. 4.12- 4.16 представлені гідрографи пропуску притоку в Дністровське водосховище за даними спостережень (1941р., 1969 р., 1980 р., 1998 р., і 2008 р.).

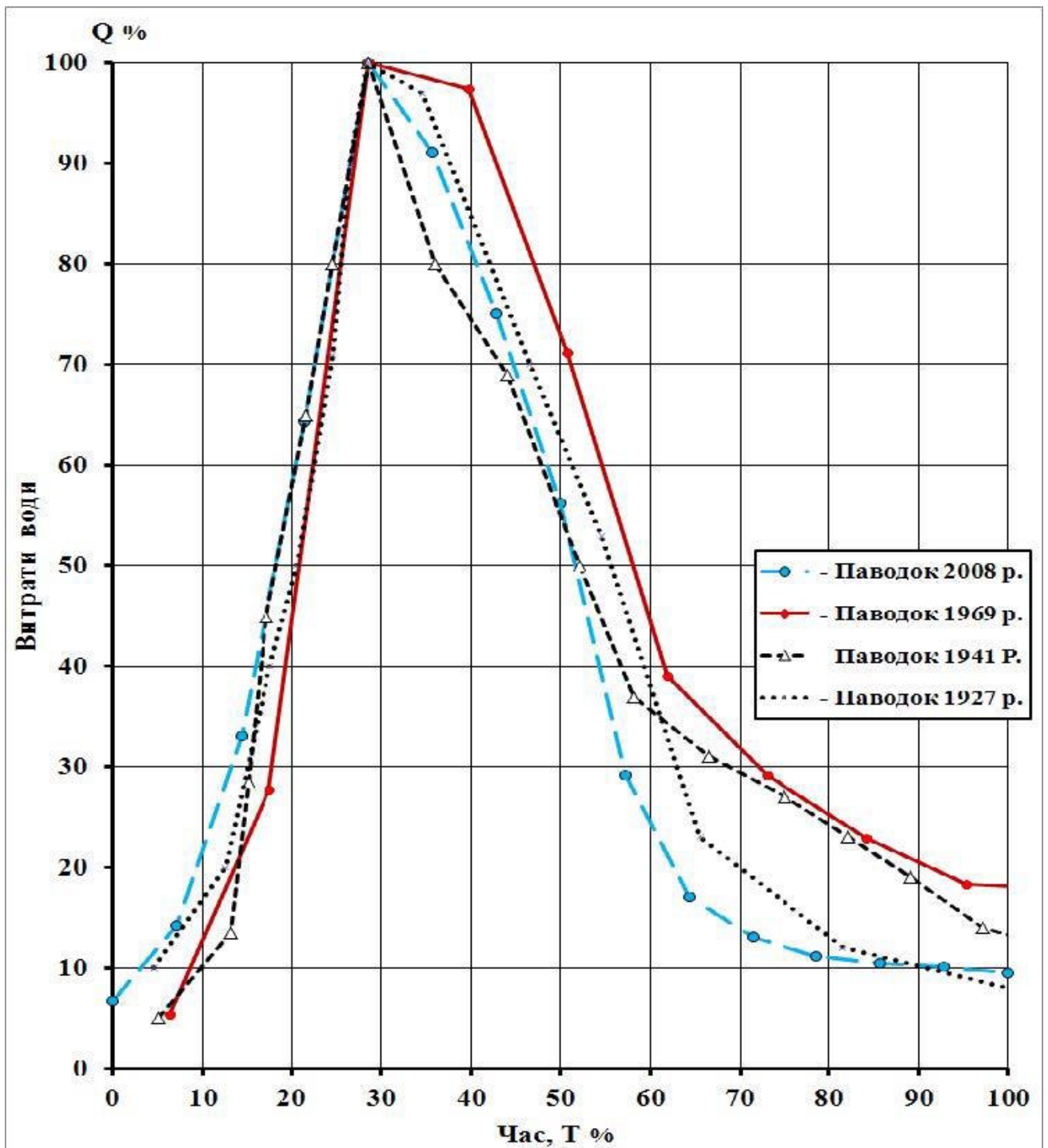


Рисунок 4.10 – Процентні гідрографи-моделі високих паводків р. Дністер гідропост біля м. Заліщики

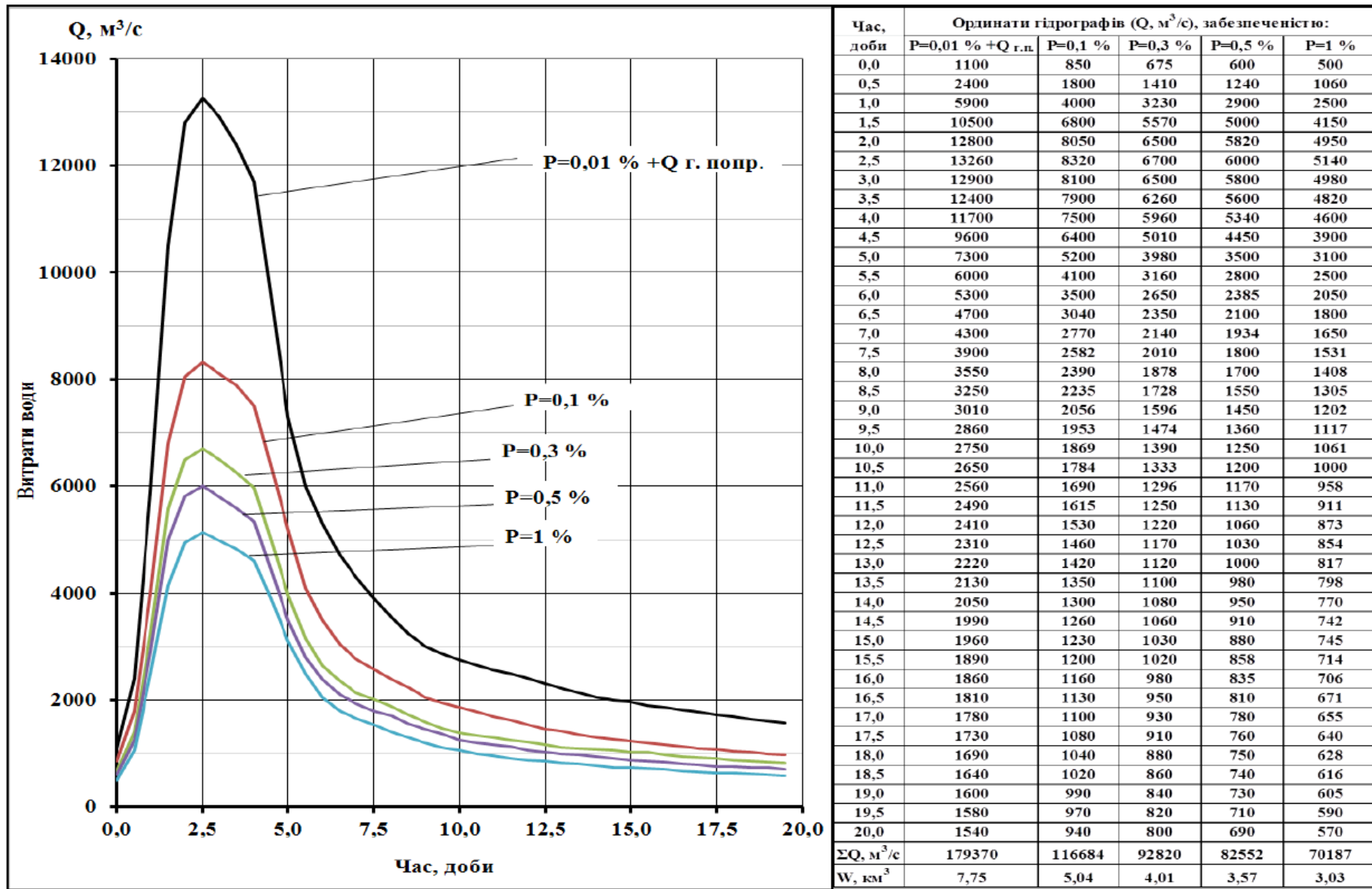


Рисунок 4.11 – Гідрографи притоку зливо-дощових паводків різних забезпеченостей в Дністровське водосховище

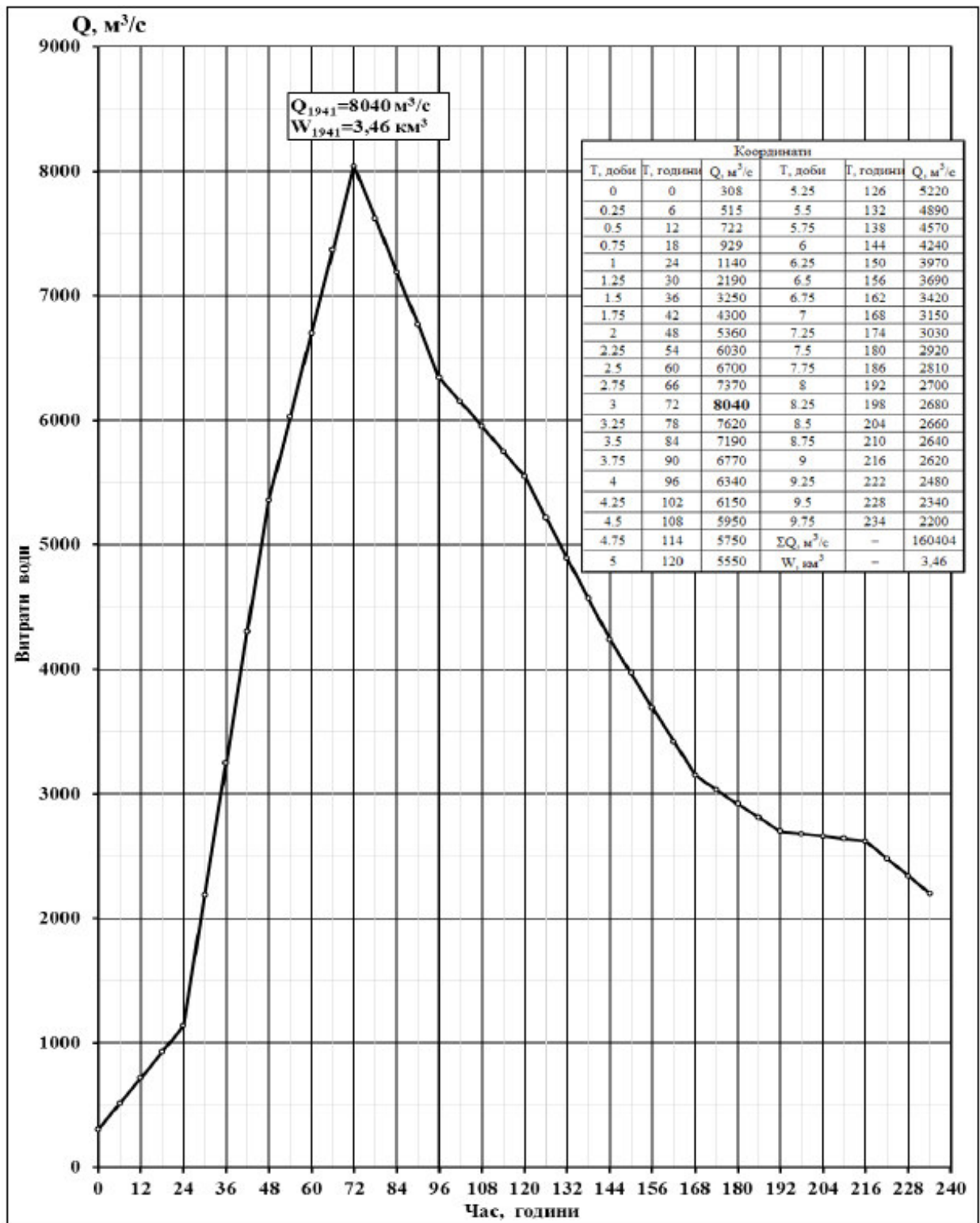


Рисунок 4.12. – Гідрограф притоку у Дністровське водосховище по спостереженням у 1941 р.

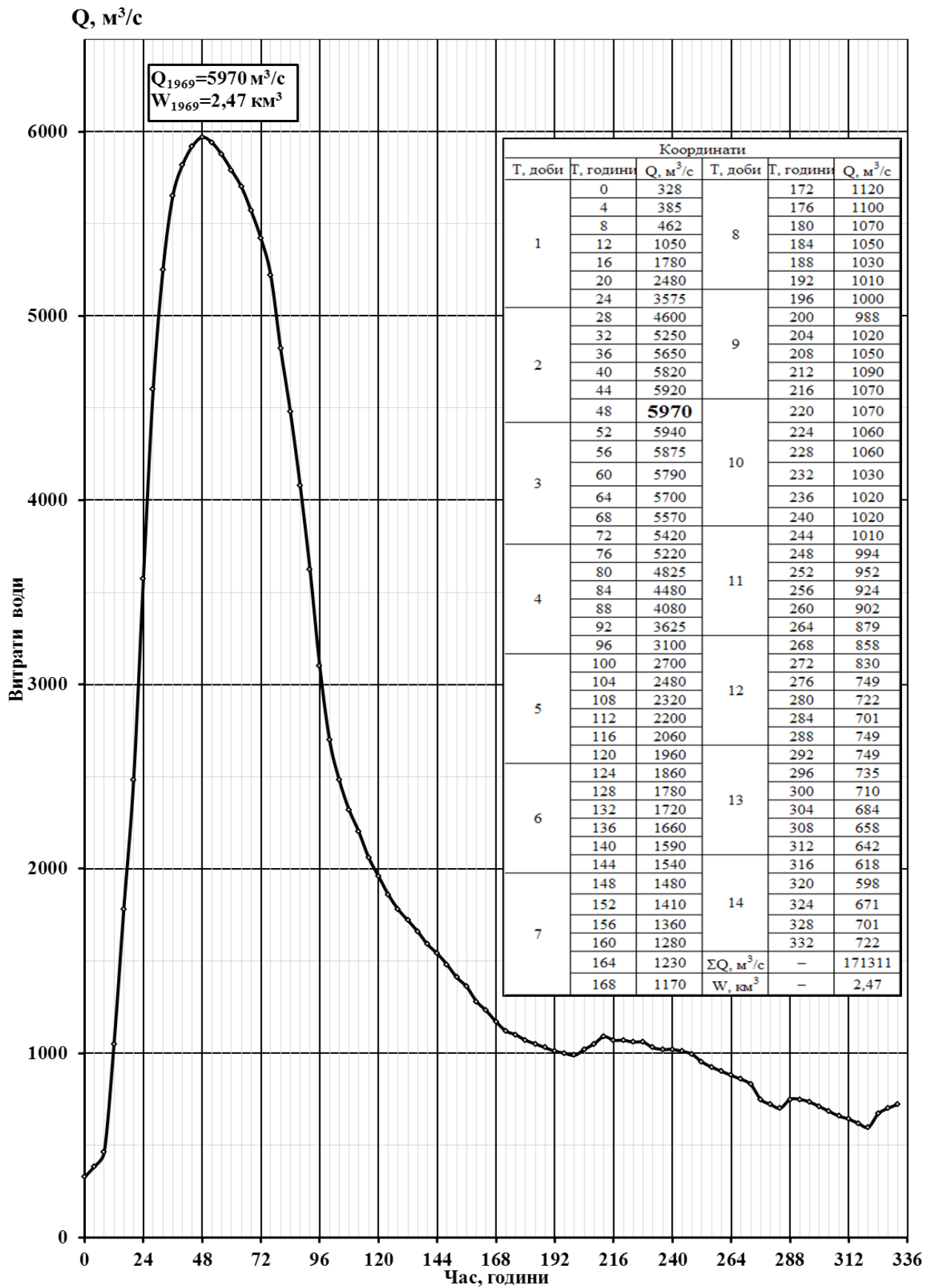


Рисунок 4.13 – Гідрограф притоку у Дністровське водосховище по спостереженням у 1969 р.

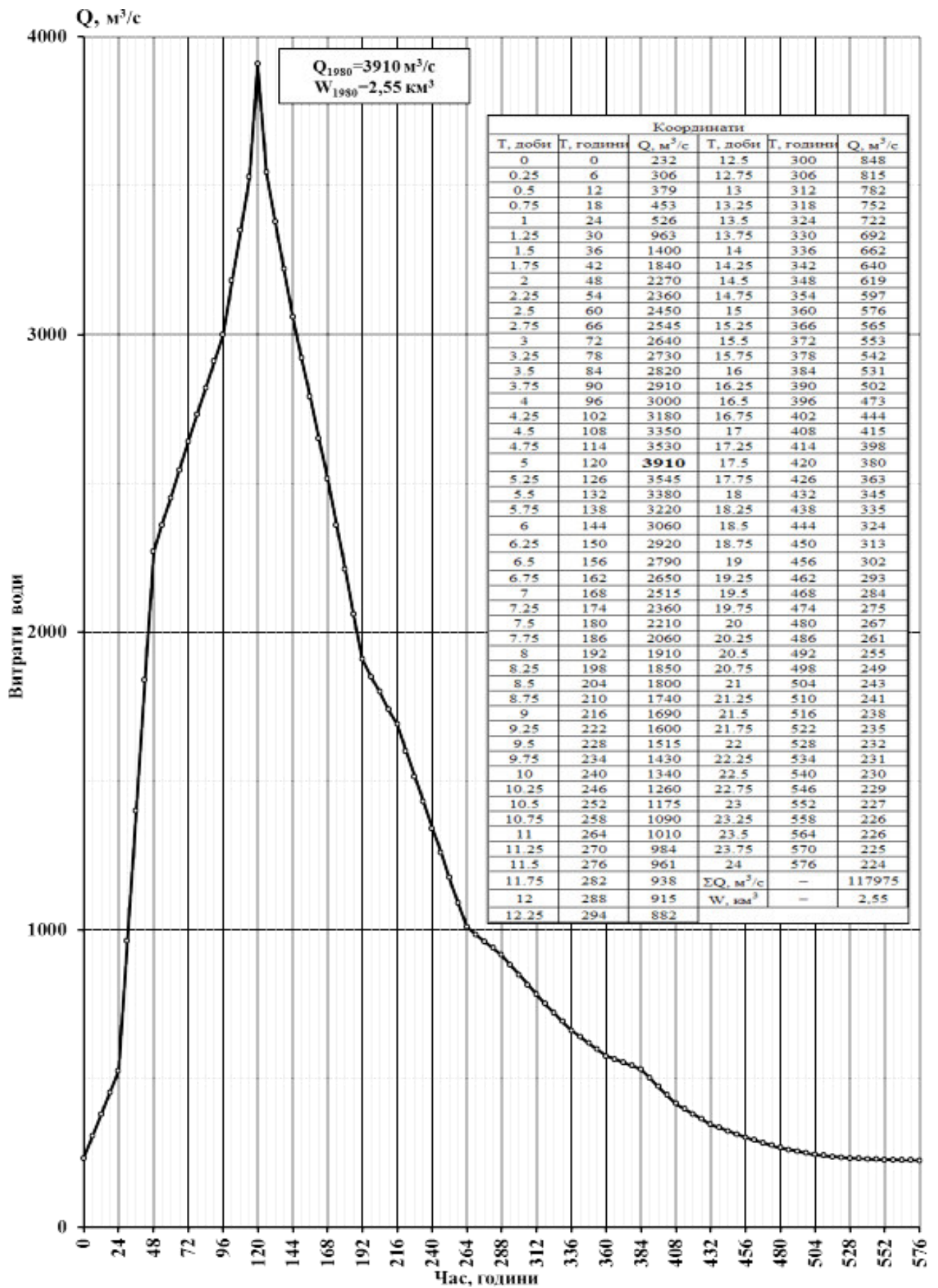


Рисунок 4.14 – Гідрограф притоку у Дністровське водосховище по спостереженням у 1980 р.

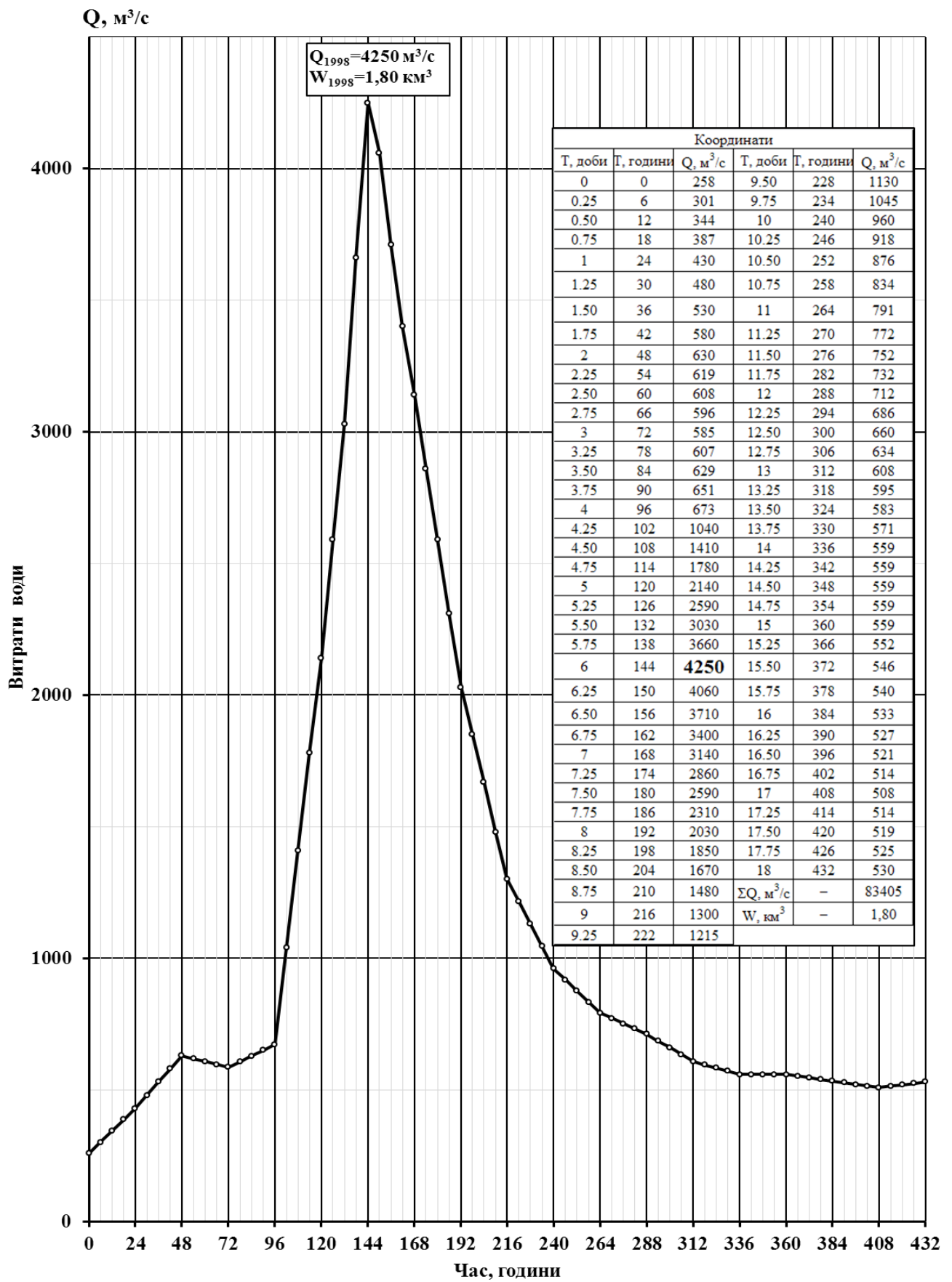


Рисунок 4.15 – Гідрограф притоку у Дністровське водосховище по спостереженням у 1998 р.

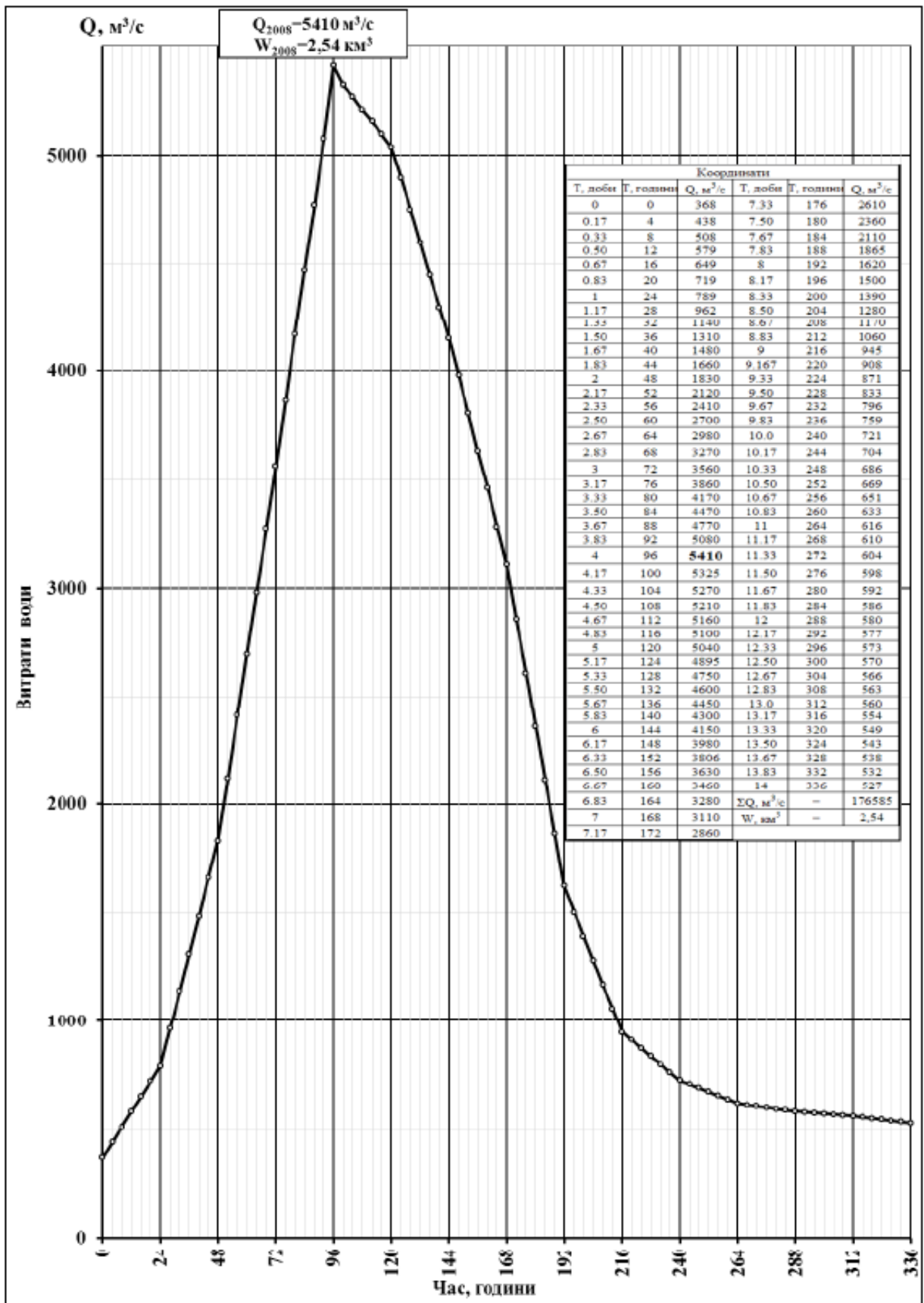


Рисунок 4.16 – Гідрограф притоку у Дністровське водосховище по спостереженням у 2008 р.

Таблиця 4.13 – Основні гідрологічні характеристики

Характеристика	Значення
1 Площа водозбору в створі Дністровської ГЕС, км ²	40500
2 Довжина р. Дністер до розрахункового створу, км	678
3 Відстань до розрахункового створу, км	684
4 Середня багатолітня витрата води в створі Дністровської ГЭС, Q ₀ м ³ /с	278
5 Об'єм стоку води, W ₀ м ³	8,77
6 Модуль річного стоку, q ₀ л/(с*км ²)	6,86
7 Розрахункові значення річного стоку (м ³ /с/км ³) різної забезпеченості:	
P=25%	330/10,4
P=50%	269/8,49
P=75%	216/6,82
P=95%	154/4,86
P=97%	140/4,42
8 Середні багаторічні сезонні величини річного стоку, км ³ /%:	
8.1 Весна (03-04)	2,38/27,1
8.2 Літо (05-09)	3,93/44,8
8.3 Осінь (10-12)	1,04/11,9
8.4 Зима (12-02)	1,42/16,2
8.5 Межень (05-02)	6,39/72,9
9 Розрахункові значення максимального стоку весняного водопілля різної забезпеченості, (м ³ /с)/(км ³)	
P=0,01%+ΔQ	9400/-
P=0,01%	8340/7,87
P=0,1%	5760/6,51
P=1%	3740/5,05
P=10%	2105/3,42
10 Розрахункові значення максимального стоку зливно-дощових паводків різної забезпеченості, (м ³ /с)/(км ³) – максимальні витрати води прийняті по проекту 1970 р.:	
P=0,01%+ΔQ	13260/-
P=0,01%	12500/7,75
P=0,1%	8320/5,04
P=1%	5140/3,03
P=10%	2750/1,56
11 Розрахункові значення мінімальних середньодобових літньо-осінніх витрат води різної забезпеченості, м ³ /с:	
P=75%	66,3
P=90%	51,7
P=95%	45,6
12 Розрахункові значення мінімальних середньодобових зимових витрат води різної забезпеченості, м ³ /с:	
P=75%	29,6
P=90%	21,6
P=95%	16,9
13 Розрахункові значення максимальних середньодобових літньо-осінніх витрат води різної забезпеченості, м ³ /с:	
P=75%	80,4
P=90%	63,5

P=95%	55,9
14 Розрахункові значення максимальних середньодобових зимових витрат води різної забезпеченості, м ³ /с:	
P=75%	79,0
P=90%	54,5
P=95%	44,7
15 Рівень посушення льоду (м. Новодністровськ, 23.03.1996р.), м. БС	106,820
16 Максимальна температура поверхневого шару води Дністровського водосховища, °С	
16.1 Верхня акваторія Дністровського водосховища (с. Рухотин, 23.07.2007р.)	36,1
16.2 Пригребельна акваторія Дністровського водосховища (м.Новодністровськ, 30.07.2005р.)	32,0
17 Максимальна спостережена товщина льоду на Дністровському водосховищі, см	
17.1 Верхня акваторія Дністровського водосховища (с. Рухотин, 10.03.2003р.)	73
17.2 Пригребельна акваторія Дністровського водосховища (м.Новодністровськ, 25.02.1985р.)	34
18 Середня багаторічна мутність річкової води (м. Могилів-Подільський), ρ г/м ³	
18.1 Природні умови	518
18. 2 В умовах зарегулювання Дністровськими водосховищами	11,2
19 Висота вітрової хвилі на пригребельній ділянці, забезпеченістю P=1%, м	
19.1 Бетонні споруди:	
19.1.1 ФПР 125,000 м БС (швидкість вітру P=20%: 22 м/с)	1,19
19.1.2 НПР 121,000 м БС (швидкість вітру P=2%: 25 м/с)	1,38
19.2 Кам'яно-земляна гребля	1,38
19.2.1 ФПР 125,000 м БС (швидкість вітру P=20%: 22м/с)	1,17
19.2.2 НПР 121,000 м БС (швидкість вітру P=2%: 25 м/с)	1,35

4.2. Характеристики та режими роботи водосховищ Дністровського каскаду

Водосховища Дністровського каскаду – Дністровське, буферне і верхнє водосховище ГАЕС – є водними об'єктами єдиної водогосподарської системи басейна Дністра. Схематична карта басейну показана на рис.4.17. Схема Дністровського каскаду ГЕС і ГАЕС показана на рис.4.18.

Основні проектні параметри водосховищ наведені в таблиці 4.14.

Криві об'ємів і площ дзеркала Дністровського водосховища показані на рис.4.19.

Режими роботи узгоджуються Міжвідомчою комісією при Держводагентстві України на підставі правил експлуатації водних об'єктів з

врахуванням екологічних вимог і інтересів всіх водокористувачів та прогнозів припливу води до Дністровського водосховища.

Дністровське водосховище – основний регулятор стоку. Воно веде сезонне, тижневе, добове регулювання, вирішуючи наступні завдання:

- зменшення негативного впливу шкідливої дії води;
- забезпечення компенсуючими попусками комунального і промислового водопостачання, екологічними попусками зрошення, судноплавства на нижче розташованій ділянці Дністра до гирла;
- виробіток електроенергії на Дністровській ГЕС.

Таблиця 4.14 – Характерні проектні рівні і морфометричні характеристики водосховищ Дністровського каскаду ГЕС та ГАЕС

Показник	Водосховище		
	Дністровське	Буферне	Верхня водойма ГАЕС
1.Характерні проектні рівні в водосховищі (біля греблі), м:			
- нормальний підпірний рівень (НПР);	121,0	77,1	229,5
- рівень мертвого об'єму (РМО);	012,5	67,6	215,5
- форсований підпірний рівень (ФПР) при пропуску паводку 0,01% забезпеченості	125,0	82,0	-
2.Статичний об'єм, млн.м ³ :			
- при ФПР;	3227	99,07	-
- при НПР;	2657	58,1	41,43
- при РМО;	750	6,5	8,73
- корисний (між НПР і РМО)	1907	51,6	32,7
- протипаводковий (між ФПР і НПР)	570	-	-
3.Площа дзеркала, км ² :			
- при НПР;	136	7,30	2,61
- при РМО;	67,9	3,35	2,19
4.Довжина, км	194 (за фарватером при НПР = 121,0 м)	19,8	2,90
5.Середня ширина, м	701	369	900
6.Глибина, м:			
- максимальна;	54	17,1	29,75
- середня	19,5	7,96	15,9

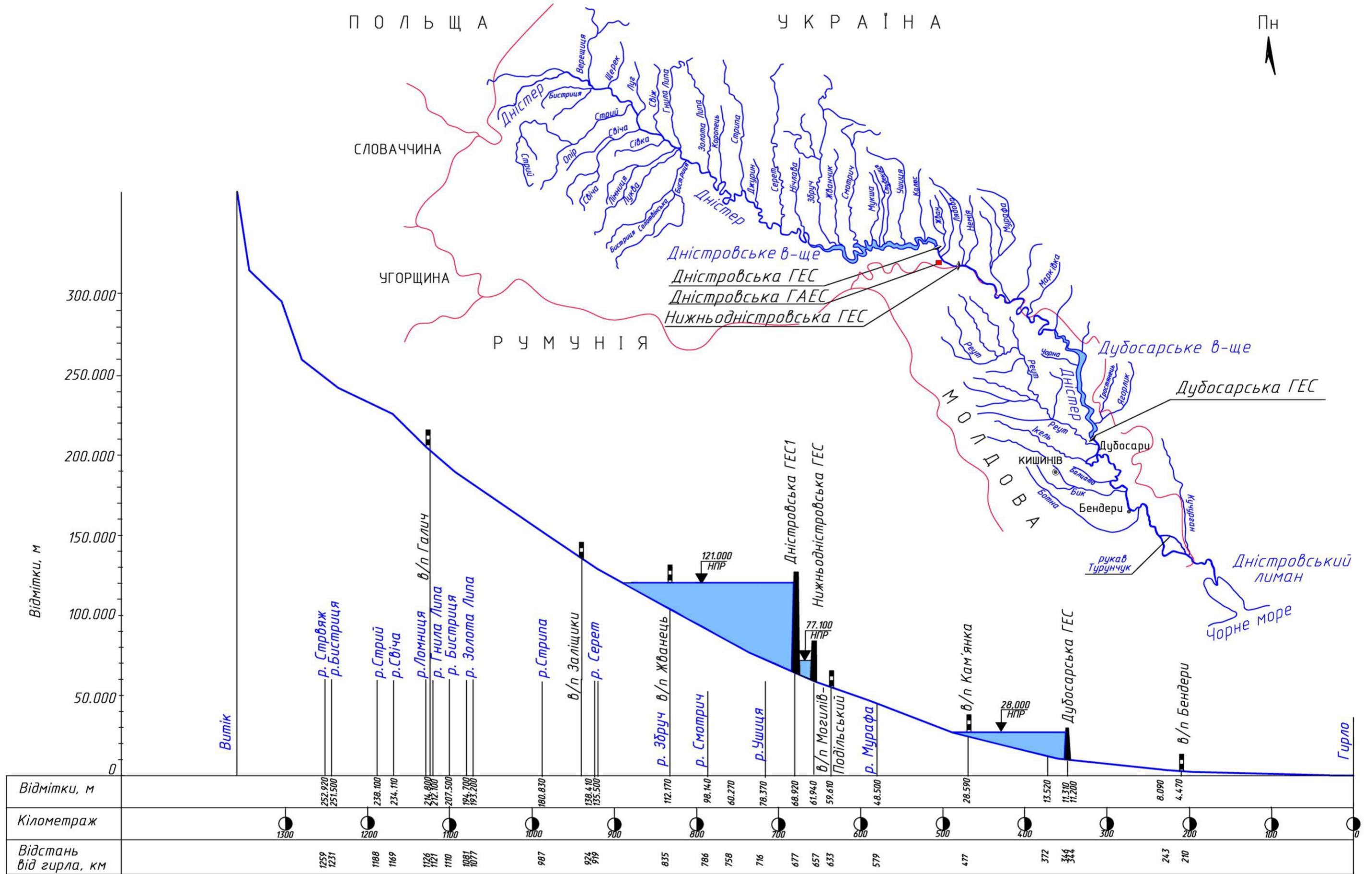


Рисунок 4.17 – Схематична карта басейну р. Дністер

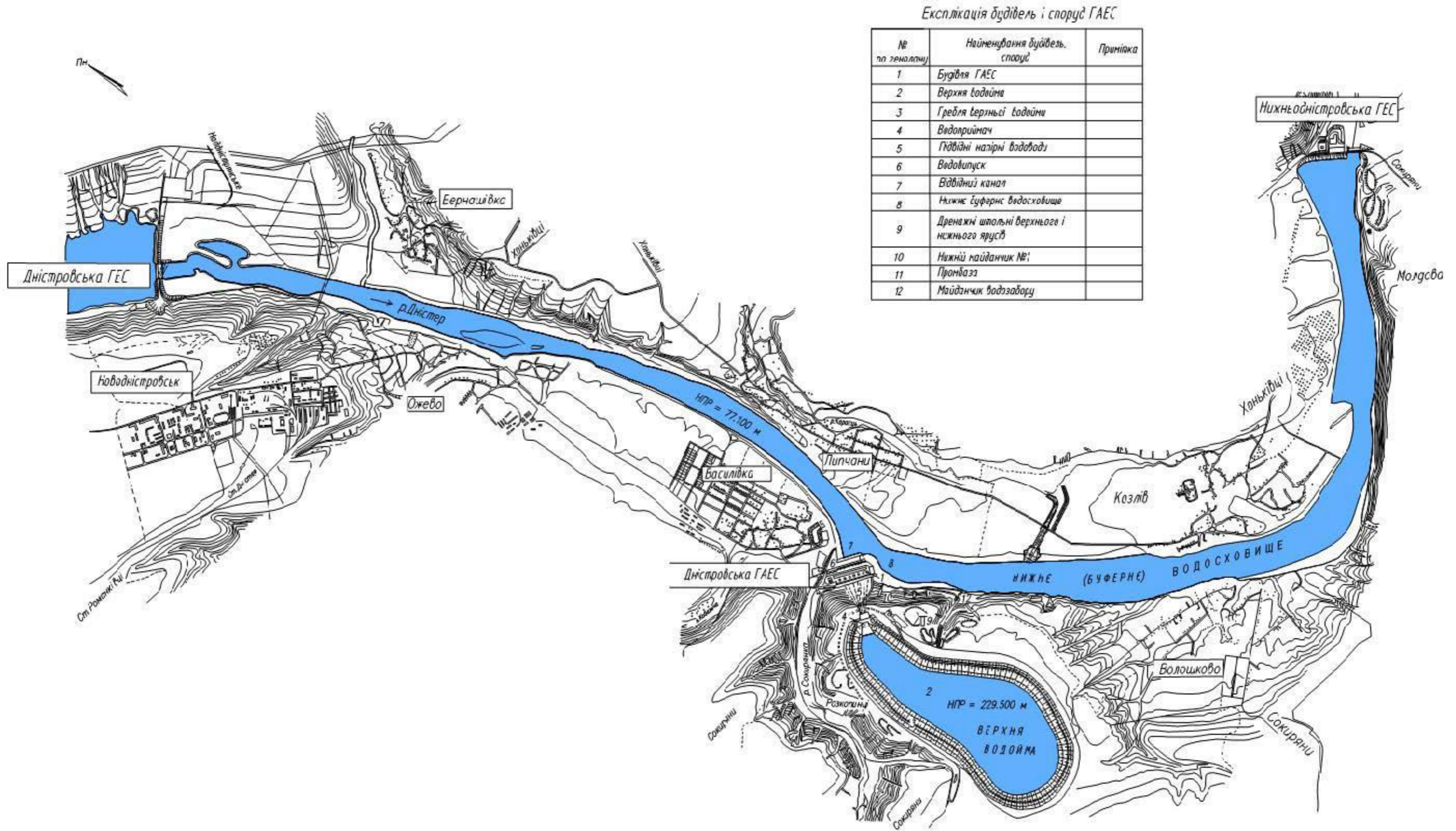
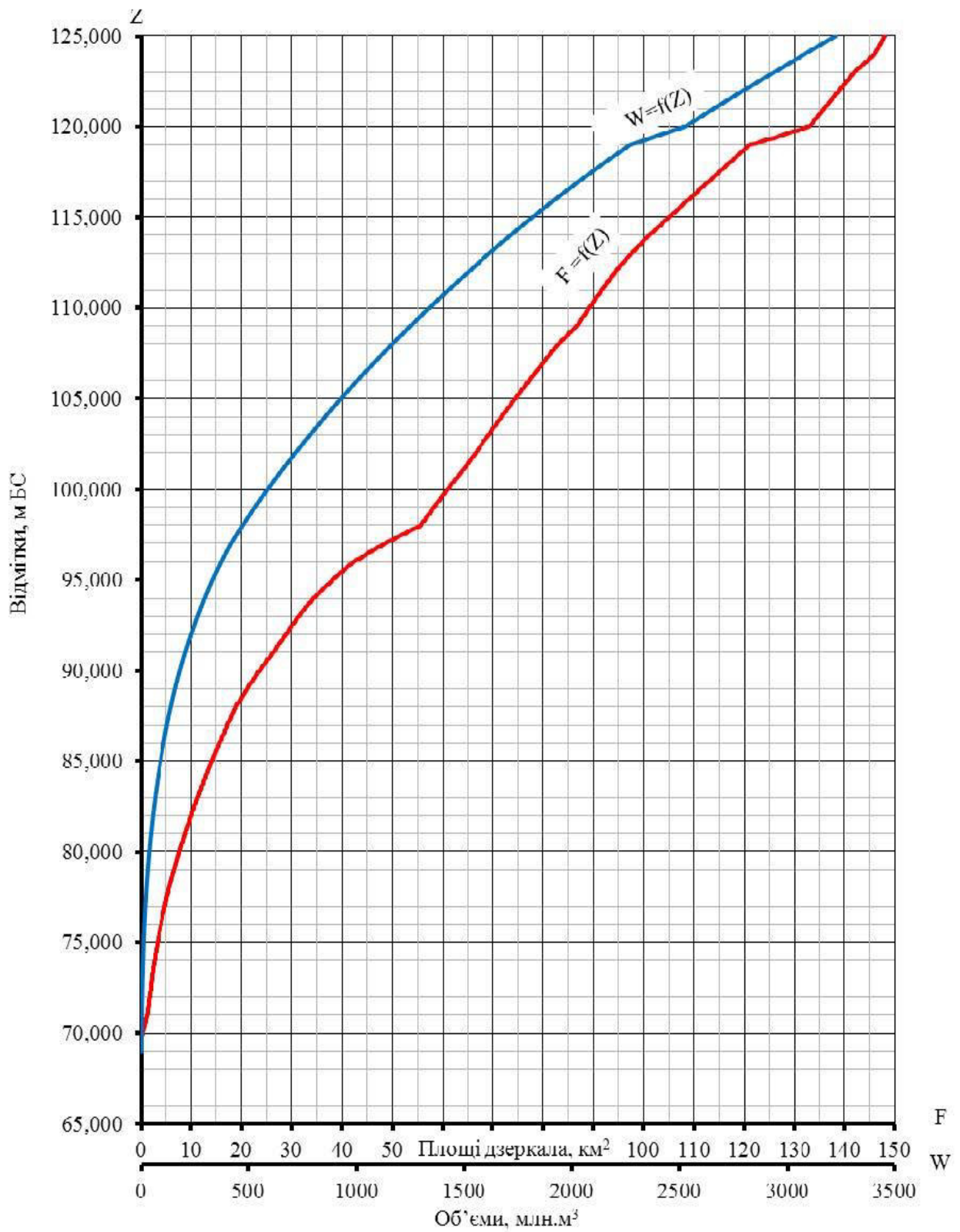


Рисунок 4.18 – Схема Дністровського каскаду ГЕС і ГАЕС



Примітка – Криві побудовані ТОВ «МЦД» на основі результатів гідрографічних робіт (732/МЦД-2-Т112, 2014 р.)

Рисунок 4.19 – Криві об'ємів і площ дзеркала Дністровського водосховища

Режим роботи Дністровського водосховища і подача води користувачам регламентується диспетчерським графіком показаним на рис.4.18.

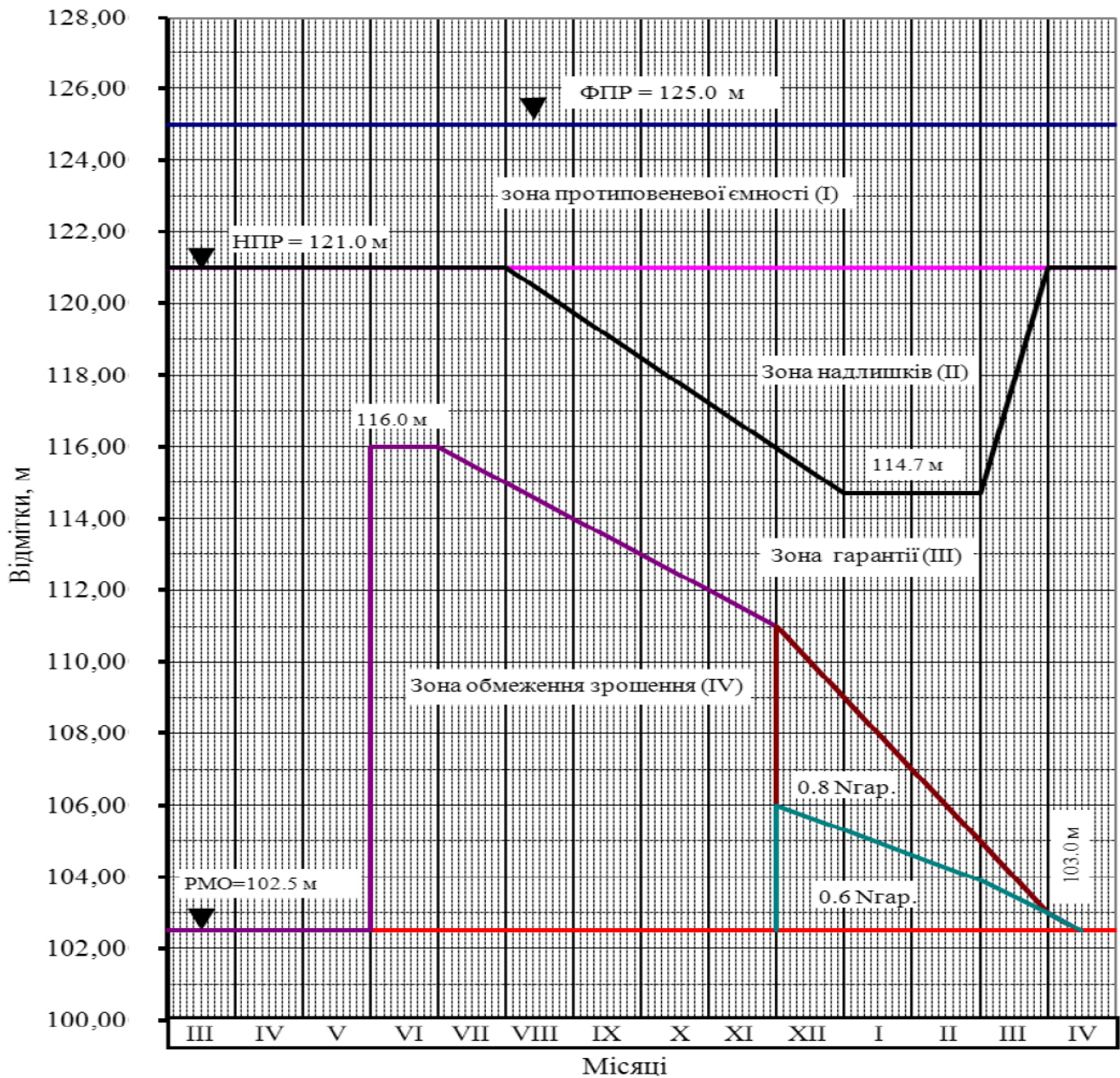


Рисунок 4.18 – Диспетчерський графік роботи Дністровського водосховища

Мінімальний середньодобовий екологічний попуск, згідно з проектом у всі періоди року повинен бути не менше $100 \text{ м}^3/\text{с}$. Ця величина обґрунтовується умовами необхідного санітарного стану річки в створах водозаборів для питних потреб населення та роботи підприємств харчової промисловості, а також підтримки відповідних глибин для судноплавства та його відстою на ремонті в зимовий період.

Максимальна середньодобова компенсуюча витрата, щоб уникнути затоплень в нижньому б'єфі, не повинна перевищувати $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ – за виключенням періоду паводків.

Буферне водосховище призначене для вирівнювання нерівномірних витрат, що надходять з Дністровського водосховища при добовому і тижневому регулюванні потужності ГЕС. Одночасно воно є нижньою водоймою ГАЕС.

Вирівнювання витрат виконується шляхом їх перерегулювання в буферному водосховищі, яке наповнюється в години роботи ГЕС і ГАЕС в турбінному режимі, і спрацьовується решту часу доби, забезпечуючи рівномірний попуск в нижній б'єф.

Призначення верхнього водосховища ГАЕС – енергетичне. Воно використовується як акумулююча водойма, яка наповнюється в години роботи ГАЕС в насосному режимі і спрацьовується в години роботи в турбінному режимі. Режим роботи ГАЕС призначається у відповідності з вимогами енергосистеми.

Режими роботи водосховищ Дністровського каскаду пов'язані між собою і залежать від величини компенсуючого попуску з Дністровського водосховища в нижню ділянку Дністра.

Розміри і графіки компенсуючих попусків встановлюються Міжвідомчою комісією в залежності від водогосподарської обстановки, гідрологічної і екологічної ситуації в басейні річки.

4.3. Топографічні дані

Топографічні дані дають опис геометрії річки Дністер на досліджуваній ділянці від гідропоста Заліщики до створу Дністровської ГЕС. Річкову сітку на досліджуваній ділянці показано на рис.4.19.

В основу всіх вихідних характеристик покладені карти масштабу 1:25000 – на притоках. А в руслі на підставі координат натурних поперечних профілів, прийнятих за Заключним звітом [34]. Таким чином, для проведення розрахунків досліджувану ділянку р. Дністер від гідрологічного поста біля м. Заліщики

(вхідний створ) до створу Дністровської ГЕС (вихідний створ) довжиною по осі потоку 257,30 км, було розділено на 57 характерних ділянок з 58 створами – поперечниками, які розміщені у місцях значних змін ширини перерізу, ухилу, шорсткості ложа. Відомість поперечних профілів на досліджуваній ділянці, таблиця 4.15.

Деякі характерні поперечні перерізи показані на рис.4.20 – 4.22.

Поздовжній профіль досліджуваної ділянки р. Дністер з початковими рівнями води на рис.4.23.

Описані розрахункові ділянки та їх створи називають первинними, оскільки для забезпечення збіжності процесу при розв'язанні системи рівнянь Сен-Венана, і для отримання достовірних результатів розрахунку в програмному комплексі МІКЕ 11, вони, в свою чергу, можуть розбиватися на більш дрібні ділянки (вторинні).

Таблиця 4.15 – Відомість поперечних профілів на досліджуваній ділянці

№пп	Назва		Відстань, км		Відмітка дна, м	Довжина ділянки, км
	створів	бокового притоку	від устя	від ДГЕС		
ДГЕС	Гребля Дністровської ГЕС		677,40	0,00	67,25	0,00
1	ПП 1		677,98	0,58	69,09	0,58
2	в/п Новодністровськ		678,10	0,70	67,25	0,12
3	678,1 км		680,10	2,00	68,48	1,30
4	ПП 2		686,30	8,85	68,41	6,85
5	с. Калюс	р. Калюс, л.б.	687,30	9,90	71,32	1,05
	в/п Неповоротове		691,00	13,60	71,84	3,70
6	с. Неповоротове		694,30	16,90	71,84	3,30
7	ПП 3		695,35	17,95	70,65	1,05
8	с. Лоєвці		705,40	28,00	72,76	10,05
9	ПП 4		706,60	29,19	74,51	1,19
10	ПП 5		711,00	33,59	77,29	4,40
	в/п Ушиця		715,00	37,60	77,00	4,00
11	с. Стара Ушиця	р. Ушиця, л. б.	717,40	40,00	76,25	2,41
12	ПП 6		725,90	48,53	82,00	8,53
13	с. Комарово		727,80	50,40	81,11	1,87
14	с. Студениця	р. Студениця, л.б.	733,10	55,70	84,38	5,30
15	ПП 7		733,70	56,30	86,46	0,60
16	Вільямівка(Рогозанів)		740,20	62,80	84,71	6,50
	в/п Грушевці		742,00	64,60	85,00	1,80
17	ПП 8		742,89	65,49	87,53	0,89

№пп	Назва		Відстань, км		Відмітка дна, м	Довжина ділянки, км
	створів	бокового притоку	від устя	від ДГЕС		
18	с. Мар'янівка		753,10	75,70	88,02	10,21
19	с. Лука Врублевецька	р. Мукша, л. б.	760,50	83,10	88,74	7,40
20	ПП 9		761,43	84,03	92,28	0,93
21	В. Слободівка		770,50	93,40	93,22	9,37
22	ПП 10		771,01	93,61	93,25	0,21
23	ПП 11		774,73	97,33	96,50	3,72
	в/п Устя	р. Смотрич, л.б.	781,00	103,60	96,10	6,27
24	ПП 12		782,13	104,73	99,89	1,13
25	Сокіл		788,80	111,40	97,95	14,07
26	ПП 13		798,24	120,84	106,43	9,44
	в/п Жванець	р. Жванчик,	803,00	125,60	100,00	4,76
27	Малинівці		808,60	131,20	101,98	5,60
28	ПП 14		812,53	135,13	110,76	3,93
29	ПП 15		820,63	143,23	112,93	8,10
30	м. Хотин		827,10	149,70	109,00	6,47
31	ПП 16		828,43	151,03	110,20	1,33
32	ПП 16 а		828,69	151,29	110,41	0,26
33	с. Жванець	р. Збруч, л. б.	830,00	152,60	109,20	1,31
34	ПП 17		835,24	157,84	111,72	5,24
35	Білевці		840,20	162,80	111,78	4,96
36	ПП 18		843,77	166,37	113,16	3,57
37	с. Волковці		852,80	175,40	116,40	9,03
	в/п Рухотин		854,00	176,60	117,00	1,20
38	ПП 19		854,52	177,12	116,97	0,52
39	ПП 20		863,63	186,23	119,72	9,11
40	ПП 21		867,57	190,17	121,92	3,94
41	с. Худиковці		868,20	190,80	119,99	0,63
42	873,6 км		873,60	196,20	121,00	5,40
43	с. Горошево		879,50	202,10	121,30	5,90
44	с. Горошево		880,50	203,10	121,36	1,17
45	ПП 22		880,67	203,27	123,10	0,17
46	с. Онуг		884,20	206,80	125,75	3,53
47	с. Самушин		889,20	211,80	128,35	5,00
48	с. Устя, паром		893,70	216,30	129,10	4,50
49	с. Устя		893,90	216,50	129,50	0,20
50	с. Колобродка		898,90	221,50	130,95	5,00
51	с. Бродок		905,20	227,80	131,70	6,30
52	с. Зозулинці		912,00	234,60	134,00	6,80
53	с. Василів	р. Серет, л. б.	918,20	240,80	136,75	6,20
54	с. Кулевці		922,00	244,60	138,15	3,80
55	с. Добровляни		929,10	251,70	140,40	7,10
56	м. Заліщики, гідроствор		933,50	256,10	140,70	4,40
57	м. Заліщики, автомат		934,70	257,30	140,27	1,20
58	м. Заліщики		935,40	258,00	140,95	0,70

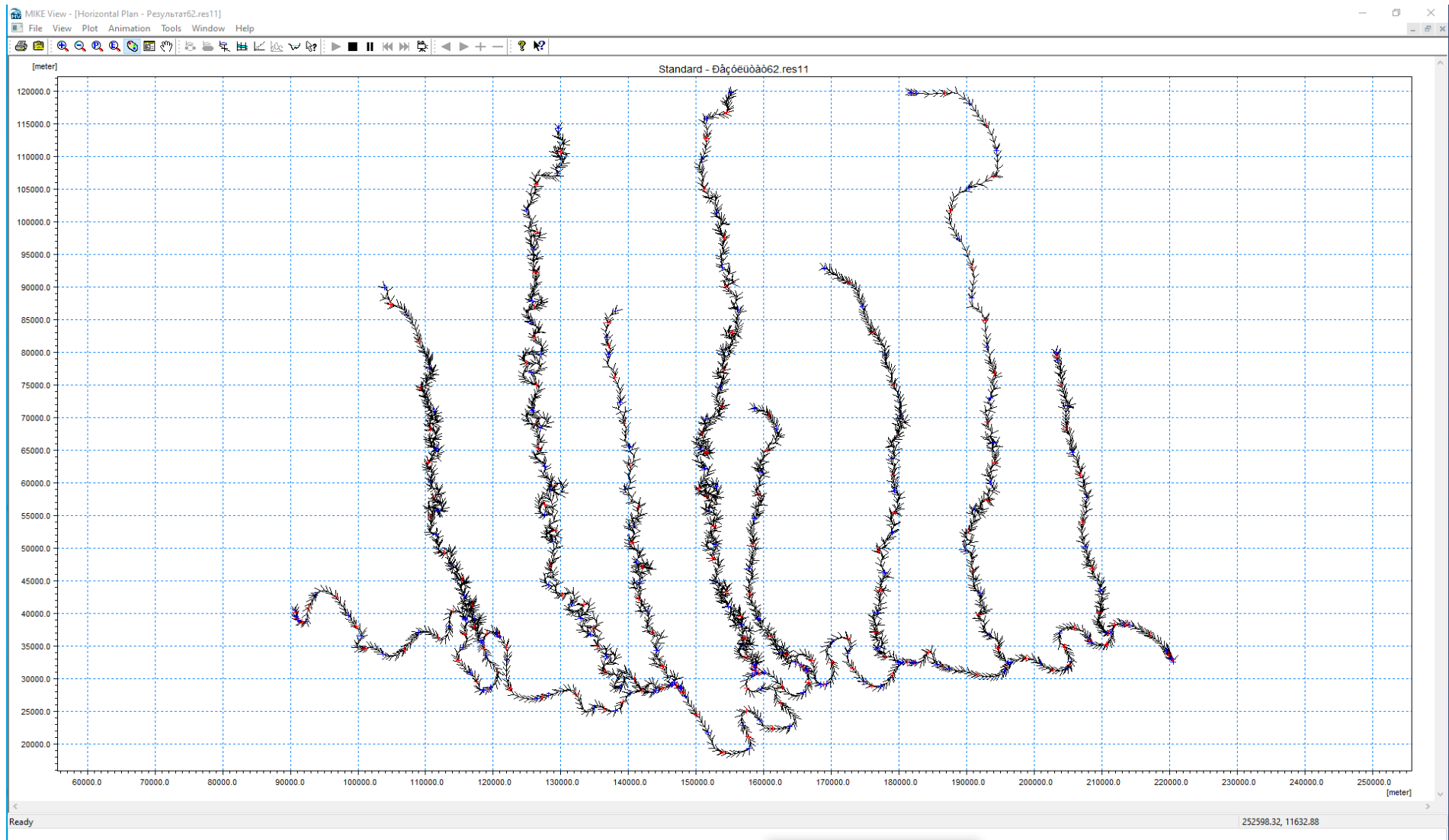


Рисунок 4.19 – Річкова сітка на ділянці від гідропоста Заліщики до створу Дністровської ГЕС з правими боковими притоками

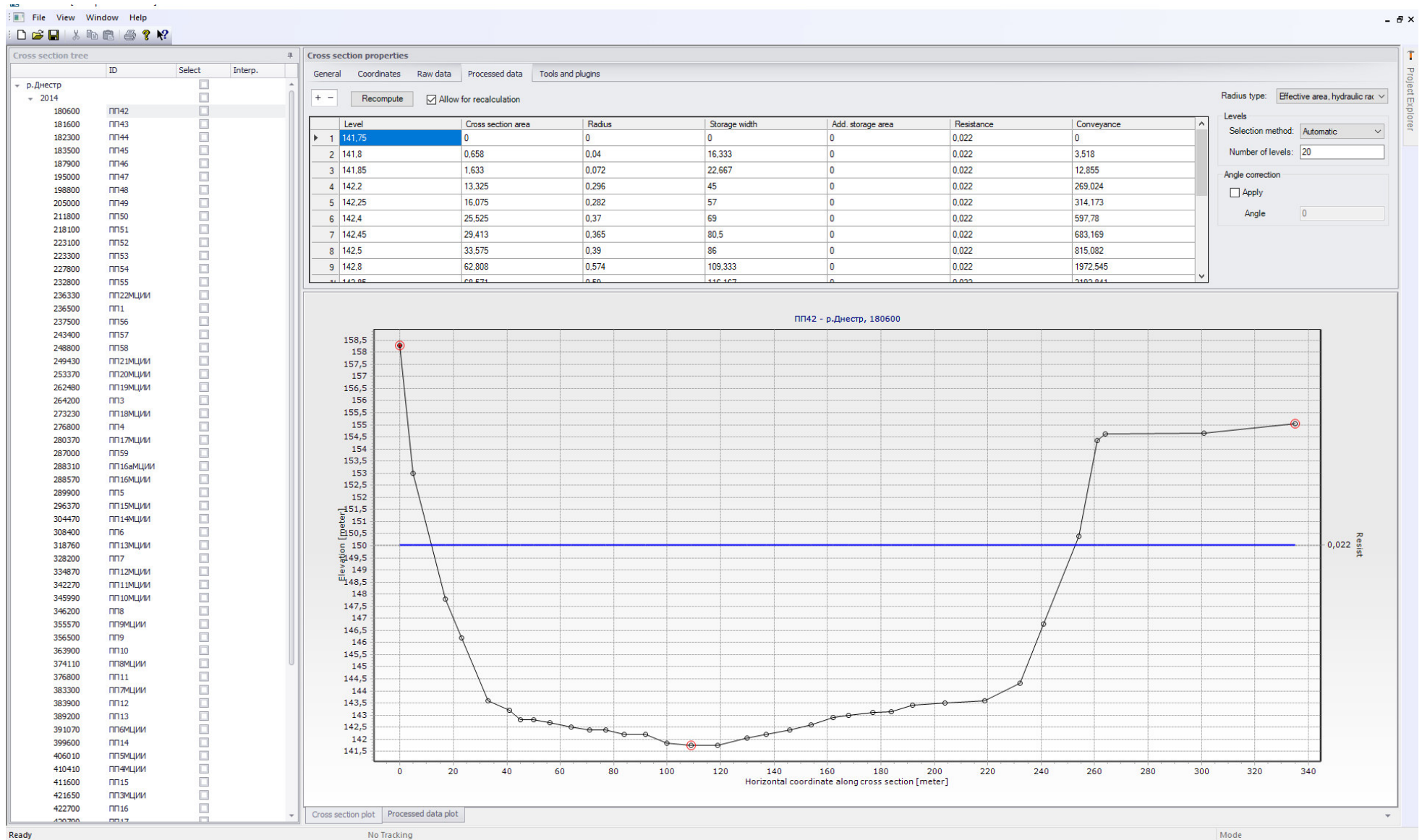


Рисунок 4.20. – Поперечний переріз м. Заліщики (гідрологічний пост)

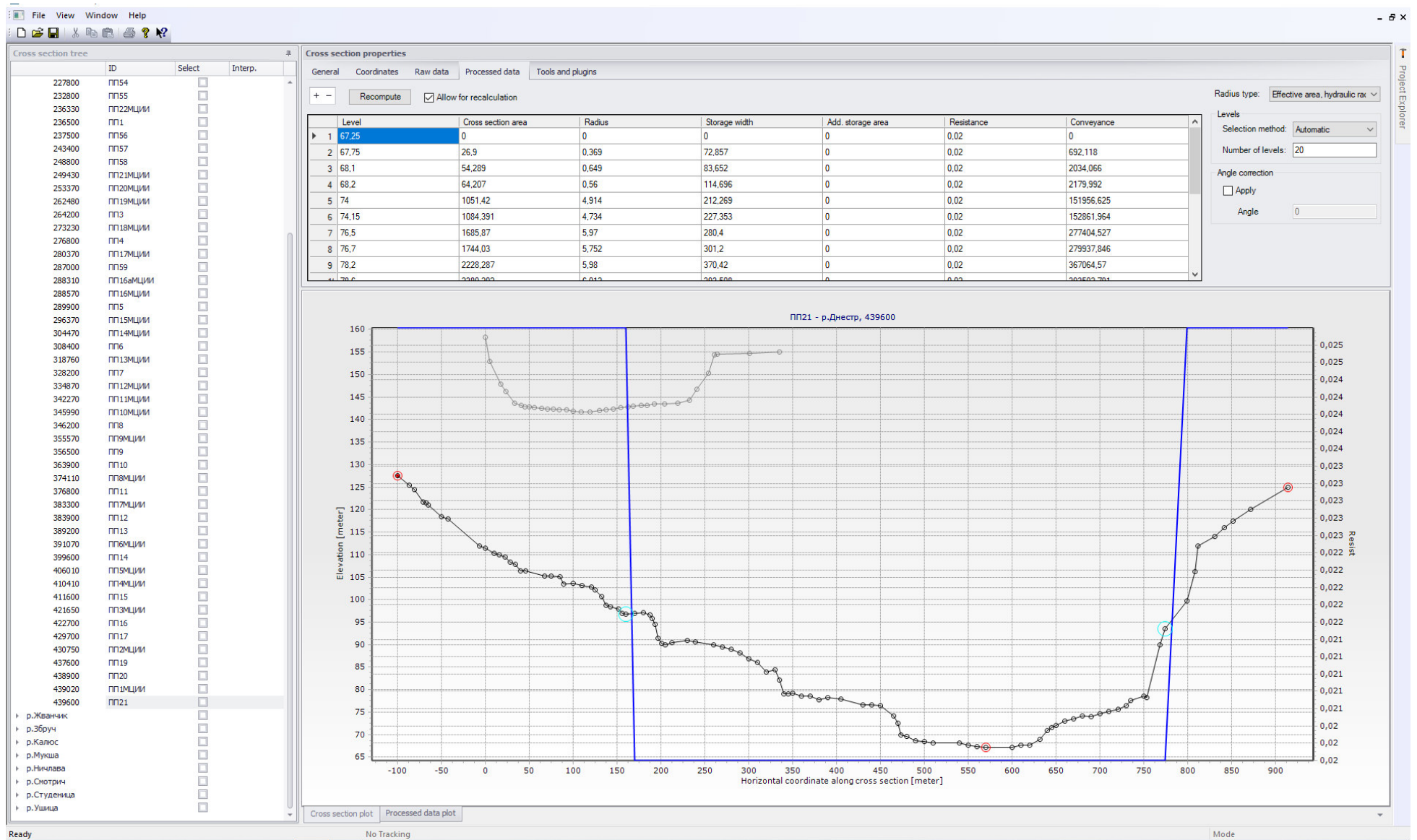


Рисунок 4.21 – Поперечний переріз створ греблі Дністровської ГЕС

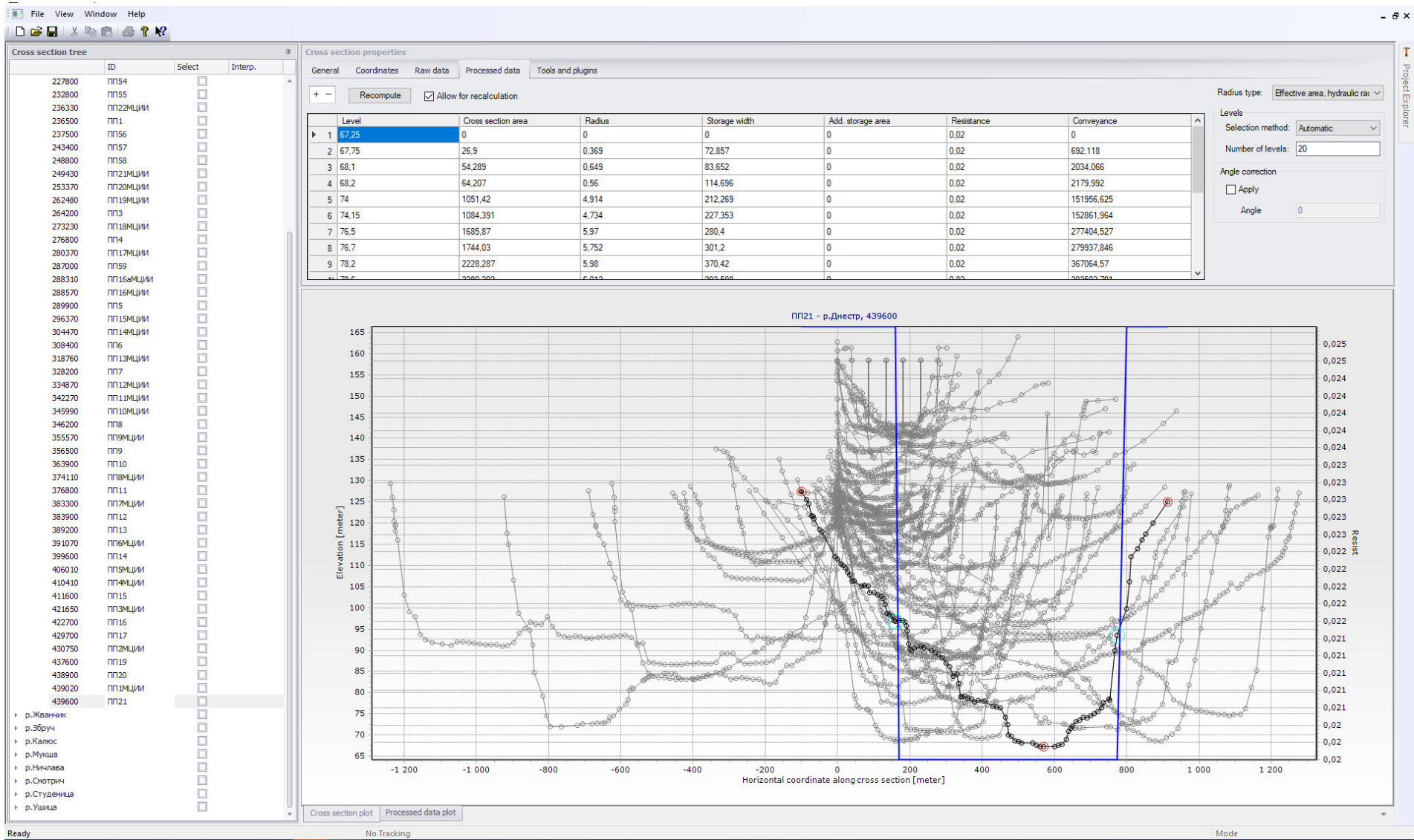


Рисунок 4.22 – Поперечні переріз по всій досліджуваній ділянці р. Дністер

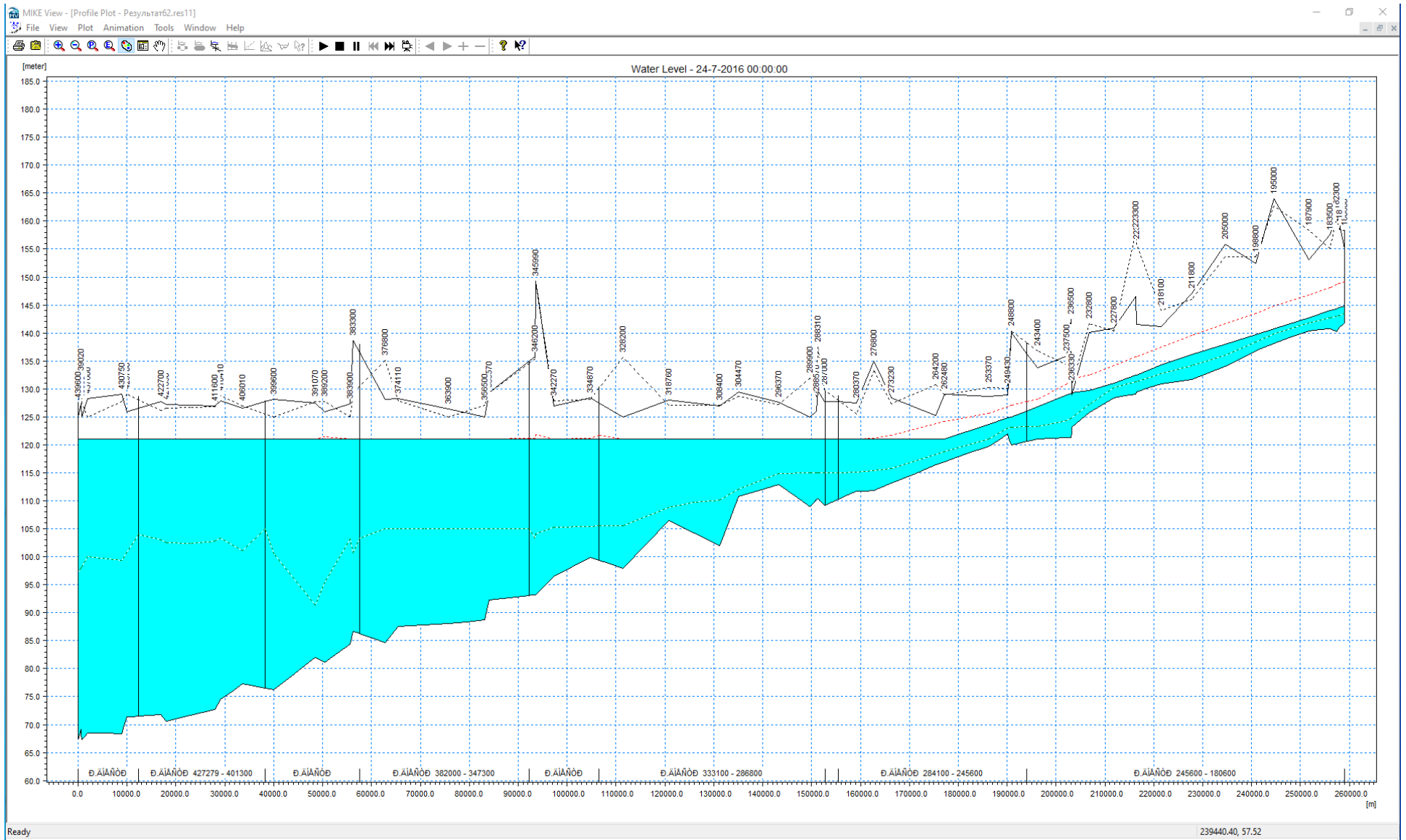


Рисунок 4.23 – Поздовжній профіль досліджуваної ділянки р. Дністер з початковими рівнями води.

4.4. Початкові та граничні умови

Для однозначності вирішення рівняння неусталеного руху води в програмному комплексі МІКЕ 11 необхідно задати граничні і початкові умови [37].

Граничні умови визначають розподіл параметрів потоку на граничних ділянках. Вони завжди однозначні і визначаються постановкою задачі.

Виділимо зовнішні граничні умови – на верхньому і нижньому кінці ділянки річки.

Граничними умовами при розрахунках руху паводкової хвилі по Дністровському водосховищі є:

На верхній (лівій) границі – в початковому створі гідрологічний пост біля м. Заліщики (0 км):

– гідрограф стоку у вигляді погодинних витрат фактичного паводку 24–31 липня 2008 року. Фактичний гідрограф погодинних витрат зафіксований оперативною службою на Дністровській ГЕС показано у таблиці 4.15.

На нижній (правій) границі – створ Дністровської ГЕС (257,30 км):

– гідрограф скидних витрат через Дністровську ГЕС у вигляді погодинних витрат фактичного паводку 24–31 липня 2008 року. Фактичний гідрограф скидних погодинних витрат зафіксований оперативною службою на Дністровській ГЕС показано у таблиці 4.15.

Також режим пропуску фактичного дощового паводку через споруди Дністровської ГЕС 24–31 липня 2008 року показано на рис.4.24.

Початкові умови при розрахунках неусталеного руху паводкової хвилі по Дністровському водосховищу відповідають даним про витрати і рівнях води в початковий період часу $t = 0$. В нашому випадку початковими умовами, були фактичні умови на 24 липня 2008 року у вигляді відміток по всій довжині досліджуваної ділянки та витрат, які надходили до вхідного створу м. Заліщики (див. таблицю 4.15).

Таблиця 4.15 – Фактичні показники витрат і рівнів при проходженні паводку
24–31 липня 2008 року

Дата	Час	Приток г/п біля м. Заліщики, м ³ /с	Скидні витрати через Дністровську ГЕС, м ³ /с	Рівні води біля Дністровської ГЕС	
				Н, м ВБ	Н, м НБ
24.07.08	8	467	532	120,62	71,3
	12	705	1672	120,54	73,6
	16	924	1402	120,45	73,7
	20	1180	1113	120,39	73,3
25.07.08	0	1670	1114	120,36	73,3
	4	1570	538	120,43	71,8
	8	1650	811	120,44	72,0
	12	1760	1688	120,45	73,9
	16	1900	1695	120,44	74,05
	20	2060	1695	120,44	74,0
26.07.08	0	2250	1690	120,46	74,0
	4	2490	1690	120,52	74,0
	8	2980	1900	120,62	74,0
	12	3590	2320	120,62	75,05
	16	4210	2530	120,64	75,20
	20	4680	2730	120,70	75,25
27.07.08	0	4930	2725	120,77	75,25
	4	5060	2730	120,86	75,25
	8	5180	2930	120,98	75,45
	12	5360	3150	121,09	75,80
	16	5410	3780	121,16	76,20
	20	5410	3380	121,23	76,20
28.07.08	0	5340	3360	121,33	76,20
	4	5160	3385	121,40	76,20
	8	5060	3400	121,54	76,25
	12	4900	3400	121,61	76,25
	16	4840	3420	121,70	76,25
	20	4690	3200	121,74	76,15
29.07.08	0	4540	2980	121,88	75,90
	4	4210	2980	121,97	75,80
	8	4150	2980	122,06	75,80
	12	4070	2760	122,15	75,45
	16	4050	2760	122,26	75,35
	20	3780	2760	122,34	75,34
30.07.08	0	3690	2760	122,42	75,40
	4	3450	2980	122,43	75,60
	8	3300	2980	122,50	75,70
	12	3110	2990	122,53	75,75
	16	2860	2990	122,53	75,75
	20	2610	2990	122,53	75,75
31.07.08	0	2370	2990	122,52	75,75
	4	2130	2990	122,49	75,75
	8	1850	2990	122,46	75,75
	12	1560	2300	122,41	75,20
	16	1310	2530	122,35	75,10
	20	1150	2300	122,31	74,80

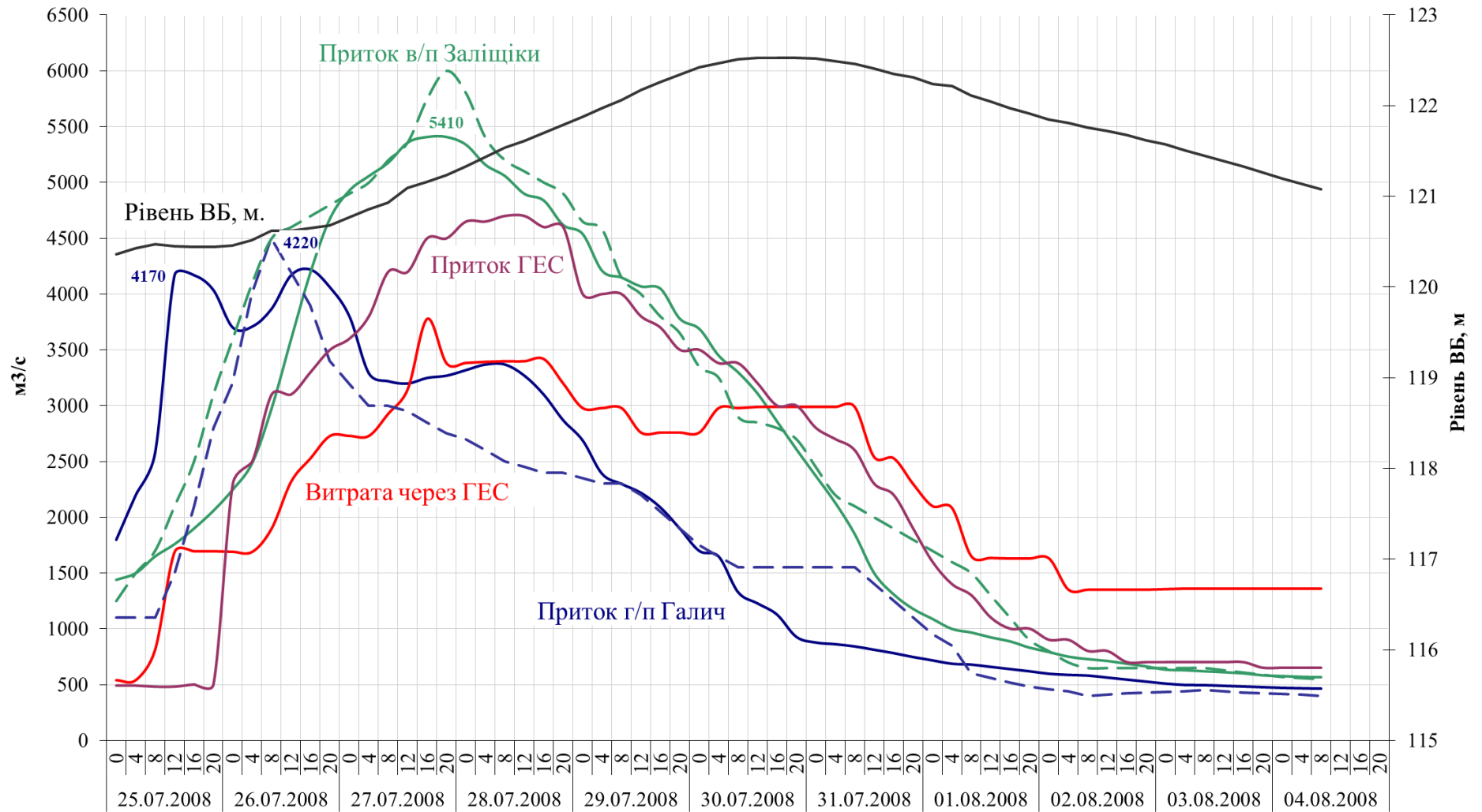


Рисунок 4.24 – Режим пропуску фактичного дощового паводку через споруди Дністровської ГЕС

24 – 31 липня 2008 року

4.5. Боковий приток

Боковий приток – додатній або від’ємний (відтік) задаємо у вигляді гідрографів в створах впадіння рік – притоків до водосховища на досліджуваній ділянці, а саме: р. Серет, р. Нічлава, р. Збруч, р. Жванчик, р. Смотрич, р. Мукша, р. Студениця, р. Ушиця та р. Калюс.

Для наглядності гідрографи правих приток до річки Дністер на досліджуваній ділянці показані на рис.4.25.

4.6. Пропускна спроможність Дністровської ГЕС

Зі створенням Дністровського водосховища з’явилась можливість зменшення збитків від затоплень шляхом регулювання паводків. Для цього в водосховищі передбачена протипаводкова ємність об’ємом 570 млн.м³, яка розташована в призмі форсування між відмітками НПР=121,0 м і ФПР=125,0м.

Водоскидними спорудами Дністровського гідровузла є:

- водозливна гребля з 12 отворами, суміщена з ГЕС;
- 6 агрегатів ГЕС.

Характеристика пропускної спроможності Дністровської ГЕС наведена на рис.4.26.

Крива витрат в нижньому б’єфі Дністровської ГЕС показана на рис.4.27.

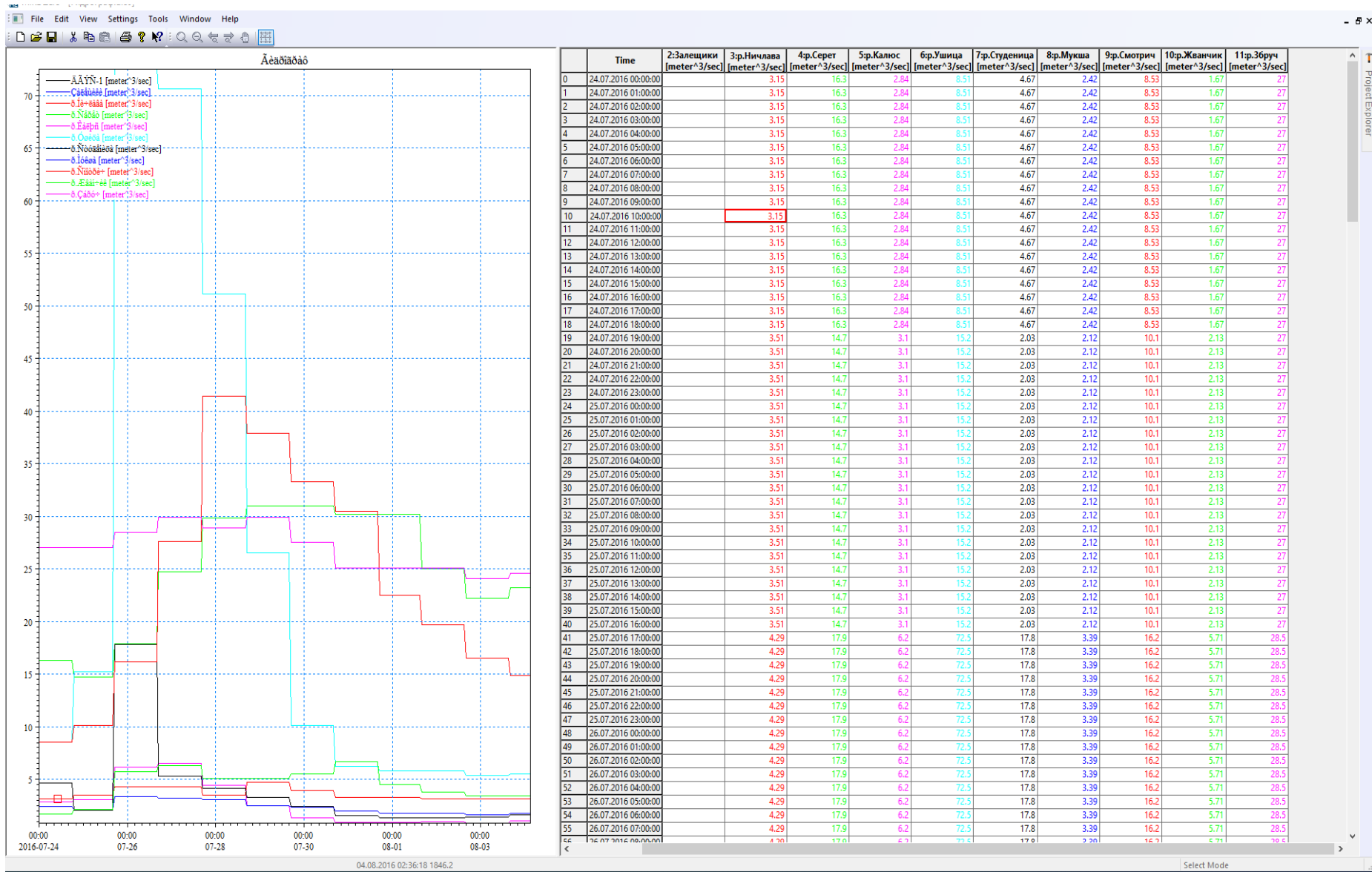


Рисунок 4.25 – Гідрографи правих бокових приток до річки Дністер на досліджуваній ділянці

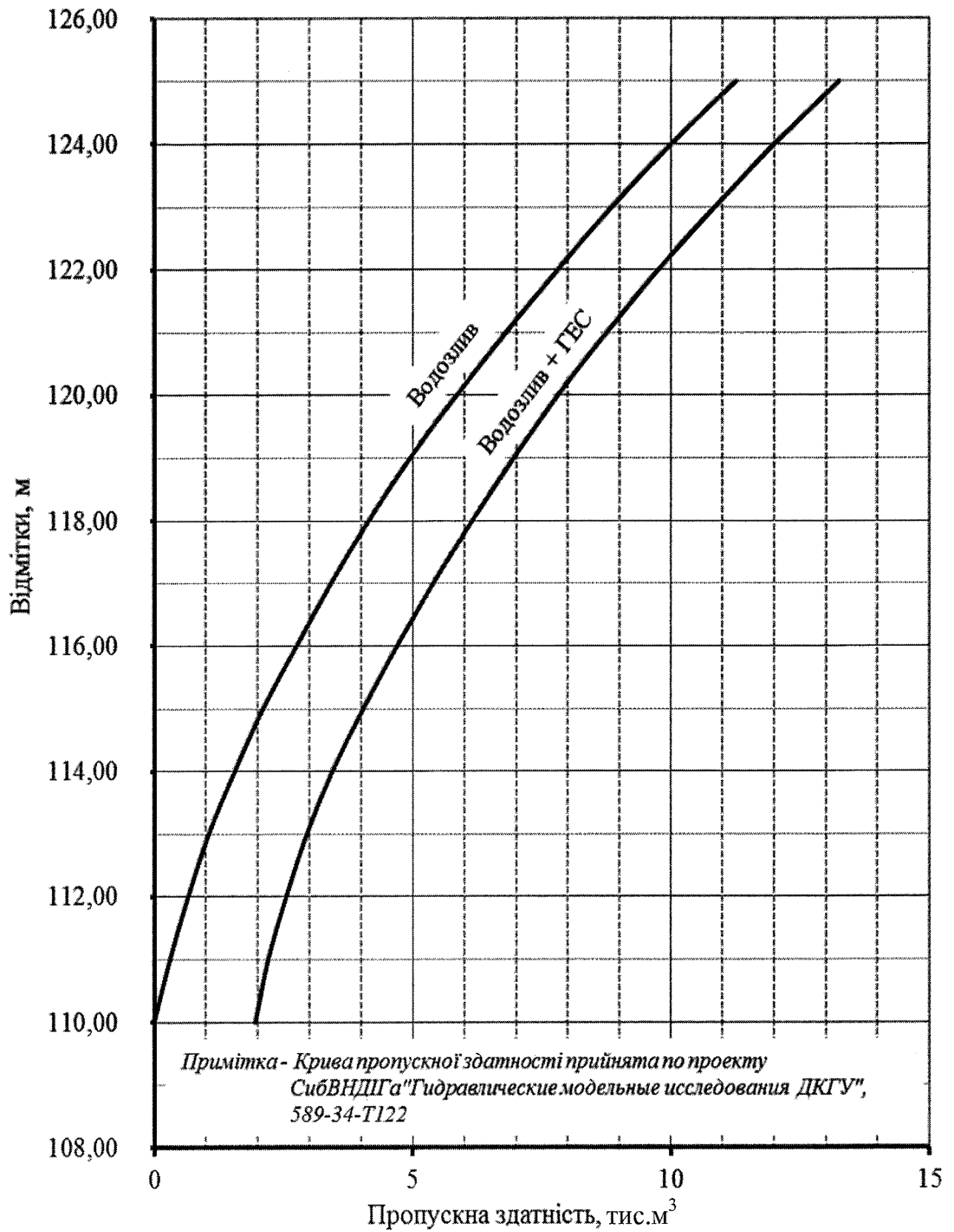


Рисунок 4.26 – Криві пропускної здатності споруд Дністровського гідровузла

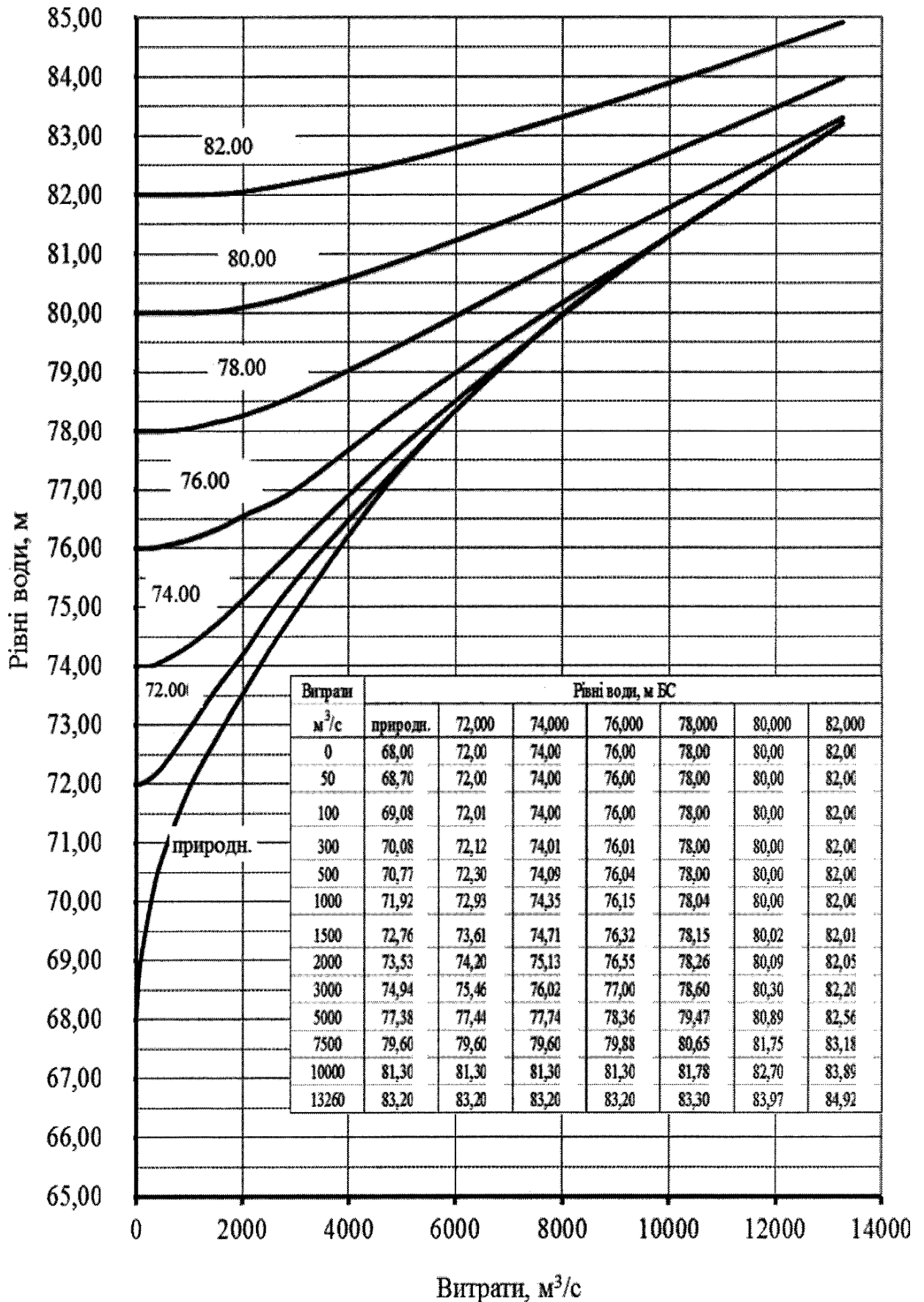


Рисунок 4.27 – Криві витрат в нижньому б'єфі Дністровського гідровузла

4.7. Калібрування моделі

Калібрування моделі – це процес підбору емпіричних гідрологічних коефіцієнтів і спрощених геометричних елементів для того, щоб відтворена поведінка потоку було представлена в моделі на скільки можливо достовірніше в порівнянні з реальними явищами в природі.

При калібруванні моделі ділянки річки Дністер важливим моментом було чітко уявляти реакцію моделі на різні дії, наприклад зміна коефіцієнтів шорсткості.

Іншими словами, калібрування є процес отримання реального фізичного опису, а не засіб "підгонки" фізичної ситуації до спрощеного способу моделювання [34, 39].

Калібрування для неусталеного потоку базується в підборі елементів моделі, при якому досягається співпадіння фактичних і розрахункових водомірних графіків.

Калібрування гідродинамічної моделі ділянки річки Дністер здійснюється шляхом зміни обмеженої кількості числа параметрів, головним чином коефіцієнтів шорсткості.

4.8. Результати розрахунку пропуску паводку 2008 року через Дністровську ГЕС (верифікація моделі)

Ріст приточних паводкових витрат у Дністровському водосховище розпочався 24 липня 2008 року. Максимальна фактична витрата $5410 \text{ м}^3/\text{с}$ біля гідропоста Заліщики (257,30 км від створу Дністровської ГЕС) була зафіксована 28 липня з 6 до 15 години.

Максимальні скидні витрати в нижній б'єф призначені оперативним персоналом Дністровської ГЕС на 27 липня з 16 до 20 годин склали $3780 \text{ м}^3/\text{с}$. Паводок продовжується з 24 по 31 липня. На початку паводки Дністровське водосховище було наповнене до позначки 120,43 м.

У результаті проходження паводку біля створу Дністровської ГЕС фіксувались рівні води. Максимальний фактичний рівень форсування Дністровського водосховища було зафіксовано на 30 липня і складав 122,53 м.

У таблиці 4.16 відображені фактичні дані приточних (гідрологічний пост Заліщики) та скидних (створ Дністровської ГЕС) витрат та рівнів за час проходження паводку (дані зафіксовані оперативною службою Дністровської ГЕС).

Таблиця 4.16 – Основні показники режиму Дністра в зоні Дністровського водосховища 24–31 липня 2008 року (оперативні дані і отримані в результаті розрахунку в програмному комплексі МІКЕ 11)

Дата	Години	Приток г/п Заліщики, м ³ /с	Скид створ Дністровської ГЕС	Рівень води біля створу Дністровської ГЕС	
				Н, м ВБ (фактичні)	Н, м ВБ (МІКЕ 11)
24.07.08	8	467	532	120,62	120,64
	12	705	1672	120,54	120,58
	16	924	1402	120,45	120,49
	20	1180	1113	120,39	120,43
25.07.08	0	1670	1114	120,36	120,32
	4	1570	538	120,43	120,40
	8	1650	811	120,44	120,41
	12	1760	1688	120,45	120,42
	16	1900	1695	120,44	120,43
	20	2060	1695	120,44	120,48
26.07.08	0	2250	1690	120,46	120,49
	4	2490	1690	120,52	120,56
	8	2980	1900	120,62	120,66
	12	3590	2320	120,62	120,65
	16	4210	2530	120,64	120,67
	20	4680	2730	120,70	120,74
27.07.08	0	4930	2725	120,77	120,81
	4	5060	2730	120,86	120,89
	8	5180	2930	120,98	121,01
	12	5360	3150	121,09	121,10
	16	5410	3780	121,16	121,20
	20	5410	3380	121,23	121,28
28.07.08	0	5340	3360	121,33	121,35
	4	5160	3385	121,40	121,42
	8	5060	3400	121,54	121,57
	12	4900	3400	121,61	121,64
	16	4840	3420	121,70	121,74
	20	4690	3200	121,74	121,76
29.07.08	0	4540	2980	121,88	121,90
	4	4210	2980	121,97	121,99

Дата	Години	Приток г/п Заліщики, м ³ /с	Скид створ Дністровської ГЕС	Рівень води біля створу Дністровської ГЕС	
				Н, м ВБ (фактичні)	Н, м ВБ (МІКЕ 11)
	8	4150	2980	122,06	122,08
	12	4070	2760	122,15	122,17
	16	4050	2760	122,26	122,28
	20	3780	2760	122,34	122,36
30.07.08	0	3690	2760	122,42	122,44
	4	3450	2980	122,43	122,47
	8	3300	2980	122,50	122,53
	12	3110	2990	122,53	122,54
	16	2860	2990	122,53	122,58
	20	2610	2990	122,53	122,58
31.07.08	0	2370	2990	122,52	122,57
	4	2130	2990	122,49	122,51
	8	1850	2990	122,46	122,49
	12	1560	2300	122,41	122,43
	16	1310	2530	122,35	122,31
	20	1150	2300	122,31	122,28

В результаті розрахунку пропуску паводку через Дністровський гідровузол в програмному комплексі МІКЕ 11, отримано величини рівнів і витрат води в кожному з 58 розрахункових поперечних розрізів кожну годину. Аналізуючи криву вільної поверхні Дністровського водосховища при проходженні паводку 2008 року 1%-ї забезпеченості максимальними витратами 5140 м³/с біля гідравлічного посту м. Заліщики (рис. 4.29), отриману в результаті розрахунків в програмному комплексі МІКЕ 11, та побудовану по фактичним оперативним даним, можна сказати наступне: максимальна розбіжність у рівнях становить 0,05 м в момент максимальних рівнів у Дністровському водосховищі біля створу Дністровської ГЕС. Враховуючи той факт, що різниця між НІР та РМО Дністровського водосховища складає 18,50 м, отримана похибка розрахунків (0,27%).

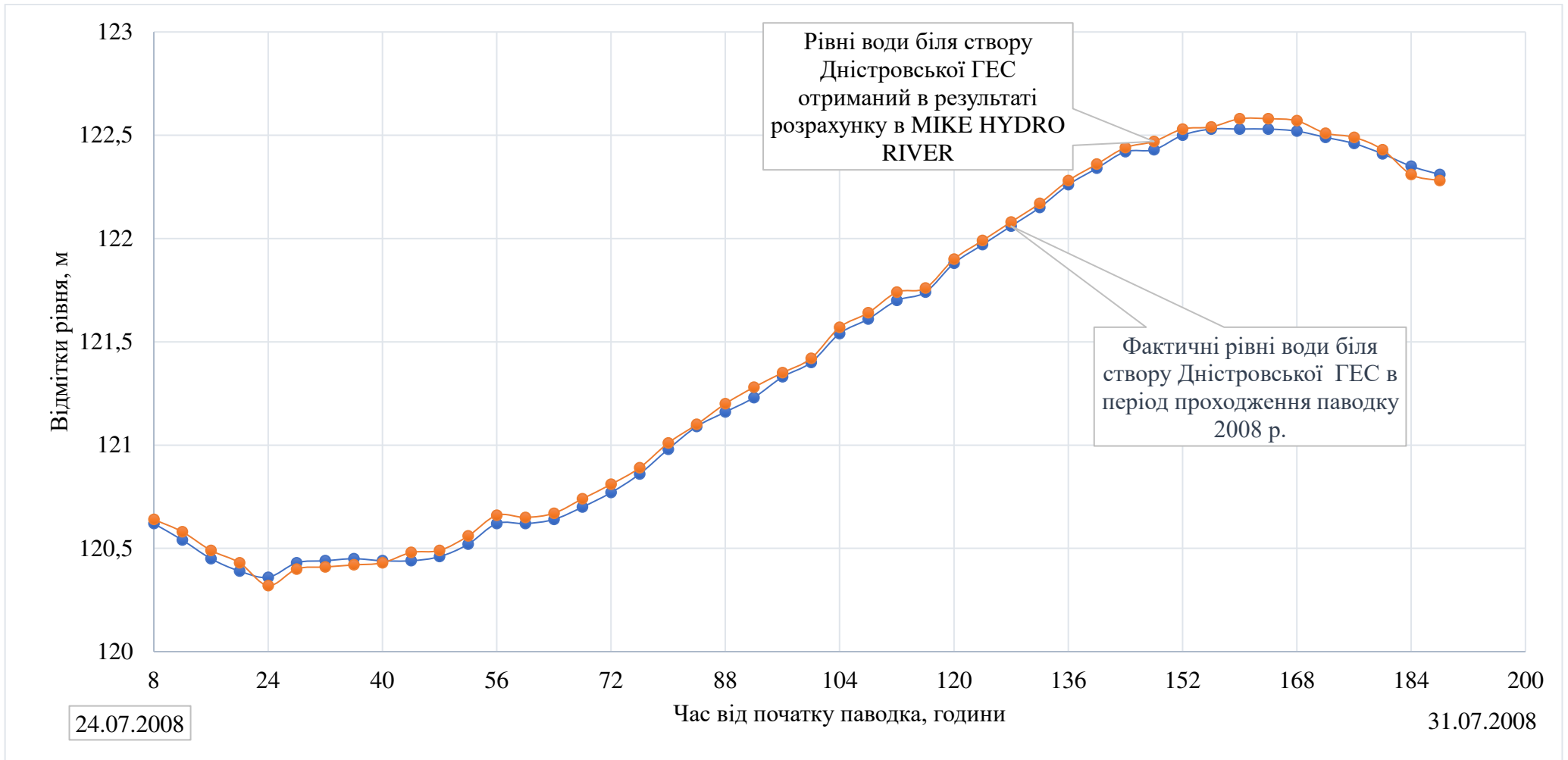


Рисунок 4.29 – Хід рівнів води (фактичний та отриманий в результаті розрахунку в програмному комплексі MIKE 11) в період проходження паводку 24 – 31 липня 2008 року

4.9. Висновки

Раніше розрахунки трансформації паводків по Дністровському водосховищу виконувались по статичним ємностям [40], які не враховують гідравлічних умов проходження паводкової хвилі по водосховищу. В такому випадку гідравлічні процеси зведені до простих балансових розрахунків притоку і скиду.

Враховуючи важливість висновків з подібних розрахунків, було проведено розрахунок неусталеного руху паводкової хвилі по Дністровському водосховищі за допомогою програмного комплексу MIKE 11, в якому побудовано гідродинамічну модель, що відтворює близькі до реальних умов характеристики досліджуваної ділянки річки та адекватно описує вплив паводкових вод на підняття рівнів у будь-якому поперечному перерізі досліджуваної ділянки річки (перевірку адекватності побудованої моделі було здійснено шляхом пропуску фактичного паводку, який мав місце у 2008 році).

Отримана похибка розрахунків становить 0,27 % (фактичні відмітки зафіксовані оперативною службою при проходженні паводку 2008 року і отримані в результаті розрахунку в програмному комплексі MIKE 11). Це свідчить про те, що розрахункова ділянка річки Дністер відтворена досить точно до природніх умов, а створену гідродинамічну модель руху паводкових вод можна використовувати у подальших розрахунках пропуску паводків та повеней різної забезпеченості.

За допомогою створеної гідродинамічної моделі стає можливим врахувати умови та характеристики виходу води на пойму та подальшого її повернення до водосховища після проходження максимальних паводкових витрат та пониженні позначок у головному руслі за досліджуваний період часу. Гідродинамічна модель визначає час добігання паводкових витрат від вхідного створу до створу гідровузла, що дає можливість здійснювати динамічні розрахунки, а не по статичним ємностям.

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНКИ ПРОПУСКУ ПАВОДКОВИХ ВОД ЧЕРЕЗ
СЕРЕДНЬОНАПІРНІ ГІДРОВУЗЛИ (НА ПРИКЛАДІ ДНІСТРОВСЬКОГО
ГІДРОВУЗЛА) УДОСКОНАЛЕНОЮ МЕТОДИКОЮ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗІВ
ПРИТОЧНОСТІ ВОДИ З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ПАВОДКОВОЇ
ХВИЛІ ТА РЕЖИМУ НАПОВНЕННЯ ВОДОСХОВИЩ

5.1 Регулювання паводків та весняних водопіль по прийнятій схемі в
затвердженому проекті Дністровського гідровузла.

Основною схемою регулювання паводків та весняних водопіль, прийнятою в затвердженому проекті [40], є схема без врахування прогнозів, яка гарантує зрізку максимальних витрат паводків 1–10 % забезпеченості до 2600 м³/с. В цій схемі використовується погодинна інформація про витрати води у створі водпоста Заліщики (основний приплив води до Дністровського водосховища). Регулювання стоку здійснюється за наступними правилами:

– якщо витрата менше або дорівнює 2600 м³/с, то вона транзитом скидається через гідровузол, рівень води в водосховищі підтримується на відмітці, що не перевищує НПР=121,0 м;

– якщо витрата більше 2600 м³/с і протипаводкова ємність ще не заповнена, в нижній б'єф потрібно скидати витрату 2600 м³/с і форсувати рівень води в водосховищі аж до відмітки ФПР=125,0 м;

– якщо витрата більше 2600 м³/с і протипаводкова ємність вже заповнена, то вся припливна витрата спрацьовується через гідровузол в нижній б'єф, а рівень води утримується на відмітці ФПР=125,0 м.

Розрахункові гідрографи дощових паводків р. Дністер по в/п Заліщики наведені на рис.5.1. Результати розрахунків регулювання паводків по схемі без використання прогнозів наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Показники пропуску паводків різної забезпеченості через Дністровський гідровузол при регулюванні по схемі без використання прогнозів

Показник	Забезпеченість паводків, Р %								
	0,01	0,1	0,5	1	5	10	20	50	70
1 Максимальна витрата по водпосту Заліщики, м ³ /с	13260	8320	6000	5140	3400	2750	2130	1330	100 0
2 Скидна максимальна витрата через гідровузол, м ³ /с	13260	8320	5550	2600	2600	2600	2130	1330	100 0
3 Максимальний рівень води в водосховищі (біля греблі), м	125,0	125,0	125,0	125,0	122,0	121,1	121,0	121,0	121, 0
4 Зменшення максимальної витрати (зрізка) за рахунок регулювання, м ³ /с / %	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{450}{7,5}$	$\frac{2540}{49,4}$	$\frac{800}{30,7}$	$\frac{150}{5,5}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$

Як видно з даних в таблиці 5.1, при регулюванні паводків за схемою без використання прогнозів зрізаються максимальні витрати тільки паводків 0,5–10%, причому більше всього зрізається паводок 1 % забезпеченості – на 2540 м³/с або на 49,4 %.

Витрати забезпеченістю менше 0,5% не зрізаються, тому що протипаводкова ємність заповнюється ще на підйомі паводку.

По розрахунковим скидним і припливним витратам були розраховані криві вільної поверхні Дністровського водосховища. Ці криві показані на рис.5.2.

Недоліком схеми без врахування прогнозів є те, що паводкові витрати забезпеченістю понад 1% або мало зрізаються, або не зрізаються взагалі. Цей недолік можна усунути, використовуючи прогнози припливу води до Дністровського водосховища.

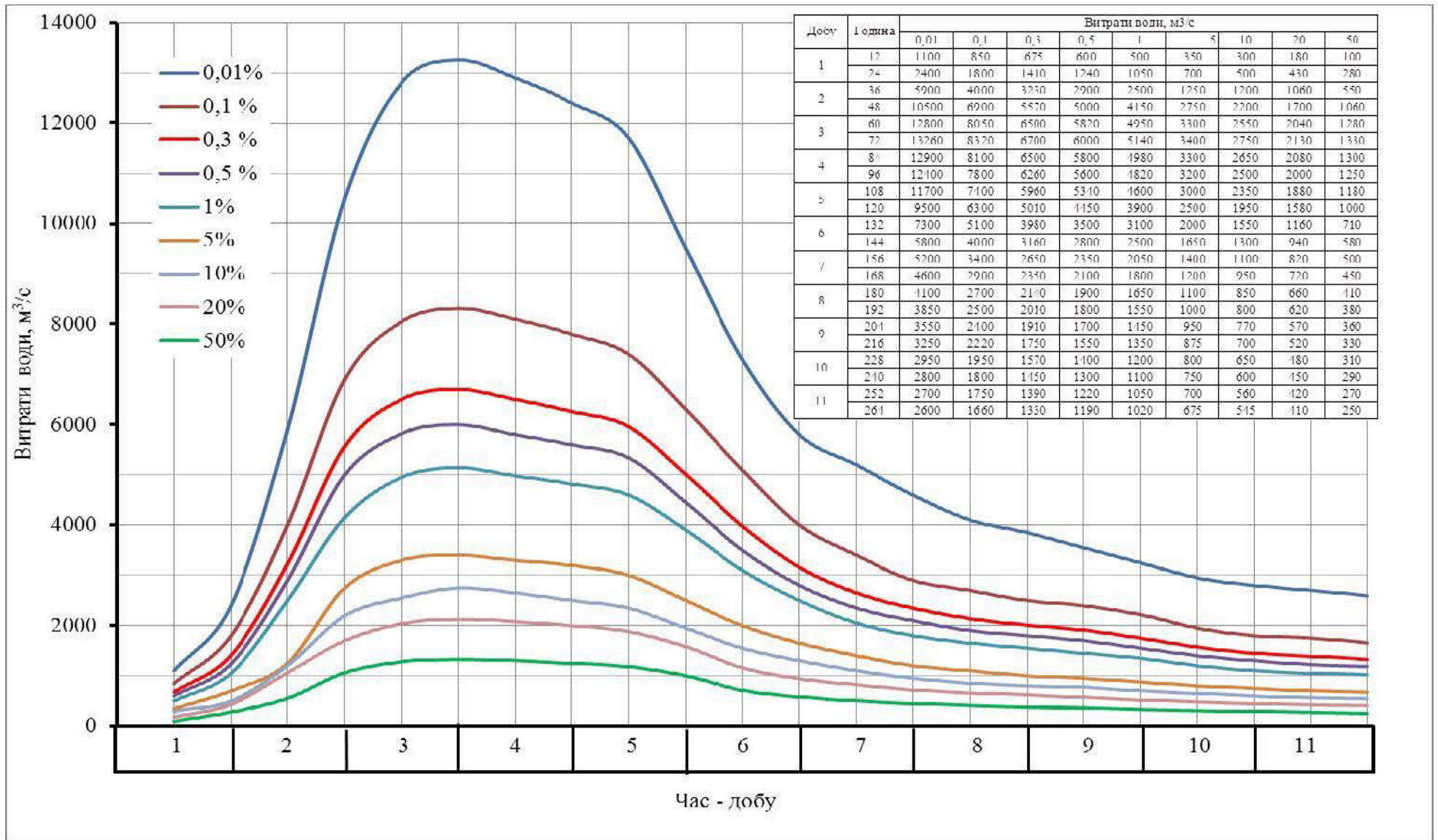
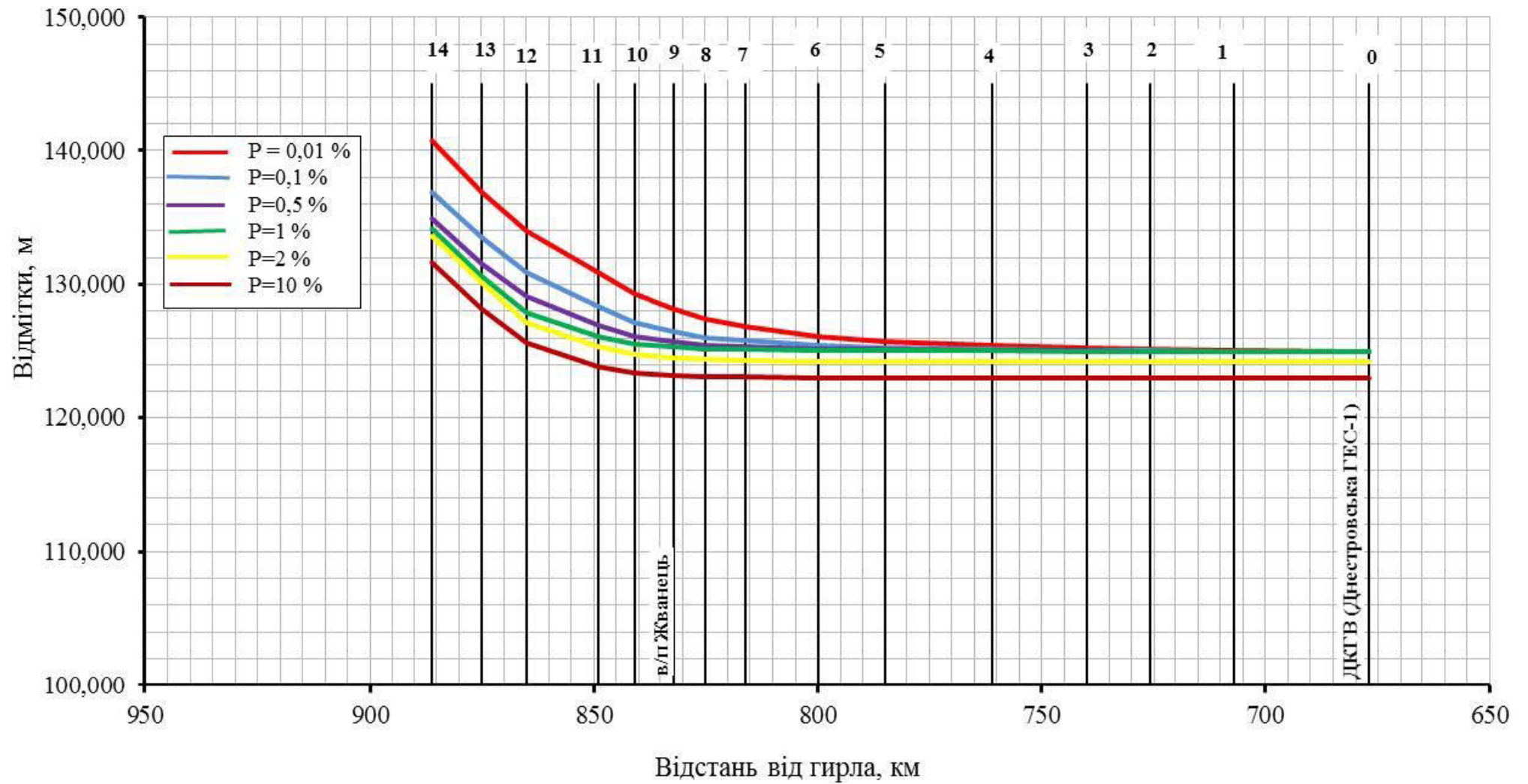


Рисунок 5.1 – Розрахункові гідрографи дощових паводків р. Дністер по гідрологічному посту Заліщики



Риунок 5.2 – Криві вільної поверхні Дністровського водосховища при проходженні паводків різної забезпеченості без урахування прогнозу

Таблиця 5.2 – Показники пропуску паводків різної забезпеченості через Дністровський гідровузол при регулюванні по схемі без використання прогнозів

№ п/п	Назва створу	Відстань від гирла, км	Максимальні рівні (м) при проходженні паводків (без врахування прогнозу) забезпеченості					
			0,01 % (Q = 13260 м ³ /с)	0,1 % (Q = 8320 м ³ /с)	0,5 % (Q = 5550 м ³ /с)	1 % (Q = 2600 м ³ /с)	2 % (Q = 2600 м ³ /с)	10 % (Q = 2600 м ³ /с)
0	Гребля Дністровського г/в	677	125,00	125,00	125,00	125,00	124,20	123,00
1	с. Лоевці	707	125,06	125,02	125,01	125,00	124,21	123,00
2	с. Дурняковці	726	125,16	125,06	125,02	125,01	124,22	123,00
3	с. Вільямовка	740	125,27	125,10	125,04	125,02	124,22	123,01
4	с. Лука	761	125,41	125,17	125,07	125,04	124,23	123,02
5	с. Устя	785	125,72	125,29	125,13	125,06	124,25	123,03
6	800 км	800	126,15	125,48	125,22	125,10	124,28	123,06
7	816 км	816	126,87	125,80	125,36	125,17	124,36	123,12
8	825 км	825	127,42	126,06	125,50	125,22	124,42	123,16
9	Жванець в/п	832	128,20	126,48	125,73	125,34	124,52	123,24
10	841 км	841	129,26	127,13	126,13	125,55	124,76	123,40
11	с. Трубчин	849	130,88	128,34	126,96	126,12	125,34	123,88
12	с.Вільховці	865	134,02	130,90	129,08	127,92	127,12	125,67
13	с. Усть-Єпископське	875	136,90	133,49	131,52	130,60	130,10	128,20
14	с. Горошово	886	140,68	136,90	134,90	134,20	133,60	131,60

5.2. Методика розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища

Методика розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища полягає в наступному:

1. Пропускні витрати в нижній б'єф Дністровського гідровузла необхідно назначати виходячи з прогнозу витрат води біля гідрологічного поста Заліщики добової завчасності (фактичні витрати).

2. При прогнозі притоку добової завчасності до 1000 м³/с пропускні витрати встановлюється рівними обсягам притоку:

$$Q_{\text{Зал}}^t \leq 1000,$$

$$Q_{\text{Т}}^t = Q_{\text{Зал}}^t,$$

де $Q_{\text{Зал}}^t$ – фактичні витрати в створі гідропосту Заліщики в момент часу t , м³/с;

$Q_{\text{Т}}^t$ – витрати через турбіни Дністровської ГЕС в момент часу t , м³/с.

3. Якщо по прогнозу біля гідрологічного поста Заліщики очікується через добу витрата менше 2600 м³/с, то через турбіни Дністровської ГЕС в нижній б'єф спрацьовуються обсяги води витратами 1960 м³/с.

$$Q_{\text{Зал}}^t < 2600,$$

$$Q_{\text{Т}}^t = 1960.$$

4. Якщо по прогнозу біля гідрологічного поста Заліщики через добу очікується більше 2600 м³/с, але менше 7200 м³/с (при похибці прогнозу +40% від 1% витрати 5140 м³/с), тоді спрацьовується 2600 м³/с.

$$2600 \leq Q_{\text{Зал}}^t < 7200,$$

$$Q_{\text{Т}}^t + Q_{\text{вод}}^t = 2600,$$

$Q_{\text{вод}}^t$ – витрата через водоскиди, м³/с.

5. Якщо по прогнозу біля гідрологічного поста Заліщики через добу очікується витрата більше $7200 \text{ м}^3/\text{с}$, то необхідно відкривати водоскидні отвори (2 години на відкриття одного прольоту) і збільшити скидні витрати. При цьому скидні витрати не повинні перевищувати $10500 \text{ м}^3/\text{с}$.

$$Q_{\text{Зал}}^t \geq 7200,$$

$$Q_{\text{т}}^t + Q_{\text{вод}} \leq 10500.$$

Алгоритм методики показано на рис. 5.3.

Режим роботи гідровузла по вищевказаній схемі призначається і коригується по мірі надходження прогнозів на підставі оперативно виконаних розрахунків трансформації паводку в Дністровському водосховищі у створеній в програмному комплексі МІКЕ 11 розрахунковій математичній моделі ділянки річки Дністер.

Після проходження паводку ємність форсування спорожняється і рівень води в водосховищі спрацьовується до відмітки НПР=121,00 м.

Для перевірки запропонованої методики пропуску паводків з використанням прогнозів були виконані розрахунки трансформації паводків забезпеченістю 0,01% максимальними витратами $13260 \text{ м}^3/\text{с}$ (найскладніший сценарій).

При цьому дотримувались наступні умови:

1. Водосховище до початок паводку заповнено до відмітки НПР=121,00 м.
2. Прогноз надходить у період паводку не рідше, ніж 3 рази на добу через кожні 8 годин і скидна витрата підтримується протягом 8 годин, до отримання наступного прогнозу.

Таблиця 4.17 – Гідрографи погодинних витрат біля гідрологічного поста Заліщики (приток) та витрати у НБ Дністровського гідровузла (скидні) при проходженні паводку 0,01% забезпеченості по Дністровському водосховищі

Години сумарні	Години	Приток в/п Заліщики, $\text{м}^3/\text{с}$	Скидні витрати через Дністровську ГЕС, $\text{м}^3/\text{с}$	
			по методиці з уточненням про фактичні витрати в г/п Заліщики кожні 4 години (рис.5.5)	по методиці з врахуванням прогнозу(рис.5.6)
0	8	100	1000	500
12	12	250	1000	800

Години сумарні	Години	Приток в/п Заліщики, м ³ /с	Скидні витрати через Дністровську ГЕС, м ³ /с	
			по методиці з уточненням про фактичні витрати в г/п Заліщики кожні 4 години (рис.5.5)	по методиці з врахуванням прогнозу(рис.5.6)
16	16	450	1000	1000
20	20	1100	1960	1960
24	0	1530	1960	1960
28	4	1960	1960	1960
36	8	2400	2600	1960
40	12	3570	2600	2600
44	16	4740	2600	2600
48	20	5900	2600	2600
52	0	7435	10500	8150
56	4	8970	10500	8150
60	8	10500	10500	8150
64	12	11270	10500	8150
68	16	12035	10500	9800
72	20	12800	10500	9800
76	0	12955	10500	9800
80	4	13107	10500	9800
84	8	13260	10500	9800
88	12	13140	10500	10500
92	16	13020	10500	10500
96	20	12900	10500	10500
100	0	12735	10500	10500
104	4	12570	10500	10500
108	8	12400	10500	10500
112	12	12170	10500	10500
116	16	11935	10500	10500
120	20	11700	10500	10500
124	0	10970	10500	10500
128	4	10235	10500	10500
132	8	9500	10500	10500
136	12	8770	10500	10500
140	16	8035	10500	10500
144	20	7300	10500	10500
148	8	6800	6800	6800
152	12	6300	6300	6300
156	16	5800	5800	5800
160	20	5600	5600	5600
164	0	5400	5400	5400
168	4	5200	5200	5200
172	8	5000	5000	5000
176	12	4800	4800	4800
180	16	4600	4600	4600
184	20	4450	4450	4450
188	0	4250	4250	4250
192	4	4050	4050	4050

Таблиця 4.18 – Координати кривих вільної поверхні при проходженні паводку 0,01% забезпеченості з використанням прогнозу приточності (рис.5.4)

№пп	Назва		Відмітки рівнів, м			
	створів	Відстань від ДГЕС	на початок паводку	в момент мін. рівня біля греблі	в момент макс. рівня біля г/п Заліщики	в момент макс. рівня біля греблі
ДГЕС	Гребля Дністровської ГЕС	0,00	121,00	115,70	117,40	122,60
1	ПП 1	0,58	121,00	115,80	117,40	122,60
2	в/п Новодністровськ	0,70	121,00	115,90	117,40	122,60
3	678,1 км	2,00	121,00	116,00	117,40	122,60
4	ПП 2	8,85	121,00	116,00	117,40	122,60
5	с. Калюс	9,90	121,00	116,00	117,40	122,60
	в/п Неповоротове	13,60	121,00	116,00	117,40	122,60
6	с. Неповоротове	16,90	121,00	116,00	117,40	122,60
7	ПП 3	17,95	121,00	116,00	117,40	122,60
8	с. Лоевці	28,00	121,00	116,00	117,40	122,60
9	ПП 4	29,19	121,00	116,00	117,40	122,60
10	ПП 5	33,59	121,00	116,00	117,40	122,70
	в/п Ушиця	37,60	121,00	116,00	117,40	122,80
11	с. Стара Ушиця	40,00	121,00	116,00	117,40	122,80
12	ПП 6	48,53	121,00	116,00	117,40	122,80
13	с. Комарово	50,40	121,00	116,00	117,40	122,95
14	с. Студениця	55,70	121,00	116,00	117,40	122,95
15	ПП 7	56,30	121,00	116,00	117,40	123,00
16	Вільямівка(Рогозанів)	62,80	121,00	116,10	117,40	123,00
	в/п Грушевці	64,60	121,00	116,10	117,40	123,00
17	ПП 8	65,49	121,00	116,15	117,40	123,00
18	с. Мар'янівка	75,70	121,00	116,15	117,55	123,00
19	с. Лука Врублевецька	83,10	121,00	116,17	117,60	123,00
20	ПП 9	84,03	121,00	116,17	117,70	123,00
21	В. Слободівка	93,40	121,00	116,17	117,71	123,00

№пп	Назва		Відмітки рівнів, м			
	Створів	Відстань від ДГЕС	на початок паводку	в момент мін. рівня біля греблі	в момент макс. рівня біля г/п Заліщики	в момент макс. рівня біля греблі
22	ПП 10	93,61	121,00	116,18	117,72	123,00
23	ПП 11	97,33	121,00	116,24	117,75	123,00
	в/п Устя	103,60	121,00	116,25	117,77	123,10
24	ПП 12	104,73	121,00	116,38	117,96	123,10
25	Сокіл	111,40	121,00	116,48	118,50	123,15
26	ПП 13	120,84	121,00	117,75	119,51	123,16
	в/п Жванець	125,60	121,00	117,80	119,53	123,17
27	Малинівці	131,20	121,00	118,82	121,20	123,20
28	ПП 14	135,13	121,00	119,82	122,10	123,60
29	ПП 15	143,23	121,00	121,90	124,00	125,00
30	м. Хотин	149,70	121,00	123,50	125,60	126,00
31	ПП 16	151,03	121,00	123,75	126,00	126,20
32	ПП 16 а	151,29	121,00	123,90	126,01	126,30
33	с. Жванець	152,60	121,00	124,20	126,40	126,40
34	ПП 17	157,84	121,00	125,60	127,80	127,60
35	Білевці	162,80	121,00	127,00	129,20	128,60
36	ПП 18	166,37	121,00	127,80	130,10	129,75
37	с. Волковці	175,40	121,40	130,30	132,60	131,93
	в/п Рухотин	176,60	121,60	130,60	132,80	132,10
38	ПП 19	177,12	121,63	130,75	132,95	132,20
39	ПП 20	186,23	122,60	132,50	134,51	133,75
40	ПП 21	190,17	123,60	133,20	135,45	134,45
41	с. Худиковці	190,80	123,80	133,40	135,50	134,65
42	873,6 км	196,20	125,40	134,40	136,51	135,60
43	с. Горошево	202,10	127,40	137,25	139,10	137,90
44	с. Горошево	203,10	127,80	138,60	140,50	139,45
45	ПП 22	203,27	127,83	138,75	140,60	139,50
46	с. Онут	206,80	129,00	139,73	141,80	140,60

№пп	Назва		Відмітки рівнів, м			
	Створів	Відстань від ДГЕС	на початок паводку	в момент мін. рівня біля греблі	в момент макс. рівня біля г/п Заліщики	в момент макс. рівня біля греблі
47	с. Самушин	211,80	130,20	140,72	142,65	141,45
48	с. Устя, паром	216,30	131,30	141,45	143,25	142,20
49	с.Устя	216,50	131,40	141,51	143,35	142,30
50	с. Колобродка	221,50	132,90	143,25	144,75	143,60
51	с. Бродок	227,80	134,60	145,80	147,25	146,10
52	с. Зозулинці	234,60	136,40	148,70	149,80	148,47
53	с. Василів	240,80	137,80	150,50	151,80	150,25
54	с. Кулевці	244,60	139,00	151,60	153,00	151,50
55	с. Добровляни	251,70	142,20	153,70	155,00	153,50
56	м. Заліщики, гідроствор	256,10	144,20	154,80	155,95	154,50
57	м. Заліщики, автоміст	257,30	146,60	155,70	156,80	155,20
58	м. Заліщики	258,00	146,70	155,80	156,90	155,30

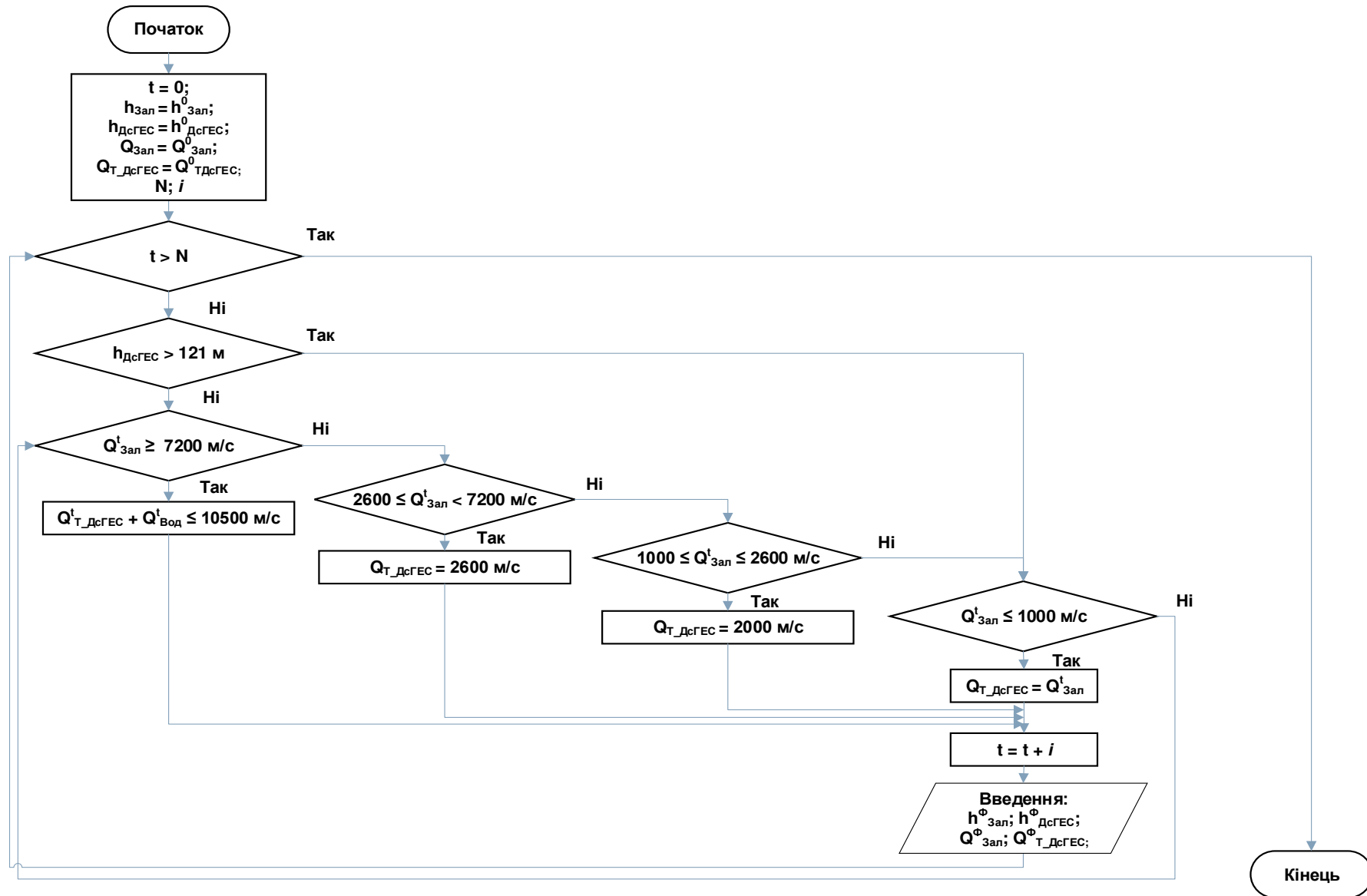


Рисунок 5.3 – Алгоритм методики розрахунку пропуску паводків через Дністровський гідровузол на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища

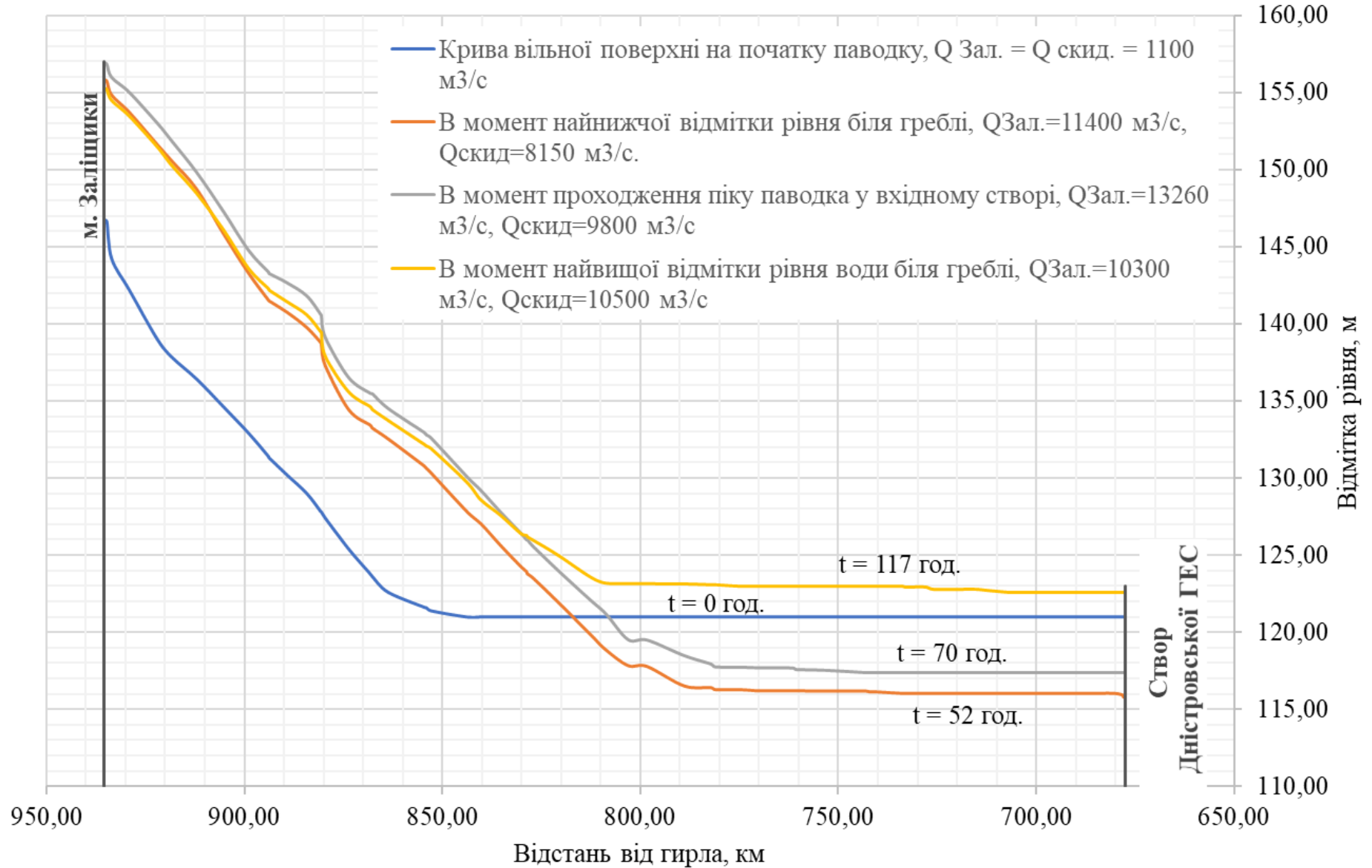


Рисунок 5.4 – Криві вільної поверхні в Дністровському водосховищі при проходженні паводка 0,01% забезпеченості з використанням прогнозу приточності

По запропонованій автором методиці регулювання паводків 0,01% забезпеченості в Дністровському водосховищі по даним прогнозів добової завчасності розглядалося 3 можливих випадки:

- прогноз виявився завищеним на + 40%;
- прогноз виявився точним 0%;
- прогноз виявився заниженим на - 40%.

В результаті розрахунку пропуску паводку через дністровський гідровузол згідно методиці запропонованої автором були розраховані величини рівнів і витрат води в кожному з 58 розрахункових поперечних перерізів. Аналізуючи зміну кривої вільної поверхні Дністровського водосховища при проходженні паводка 0,01% забезпеченості (рис.5.4), можна стверджувати, що в період підйому паводка в хвостовій частині водосховища накопичуються значні об'єми води, які поступово просуваються до греблі. Тому в цей період часу на ділянці, прилеглій до греблі, відбувається зниження рівня води, не дивлячись на те, що скидні витрати менше приточних.

Найнижча відмітка рівня води у водосховищі біля греблі по розрахунку складає 115,75 м і приходиться на той момент часу (52 години), коли приточна витрата на підйомі паводка досягла величини 11400 м³/с, а скидна – 8150 м³/с. В момент, коли біля Заліщиків проходила максимальна витрата паводка, рівна 13260 м³/с, а скидна витрата була рівна 9800 м³/с, рівень води біля греблі був все ще нижче нормального підпірного рівня (121,00 м).

На самому спаді паводка, хоча скидні витрати перевищують приточні, відбувався підйом рівнів води біля греблі. Це підвищення рівня пояснюється переміщенням динамічних об'ємів, що накопичувалися в період підйому паводка з хвостової частини на пригребельну ділянку водосховища. Найвищий рівень форсування досягнув відмітки 122,60 м в момент, коли витрата води у гідрологічного поста Заліщики була рівною 10300 м³/с, а скидна – 10500 м³/с.

Таблиця 5.3 – Результати розрахунків регулювання паводків 0,01 %
забезпеченості

Паводок забезпечено сті	Максимальна приточна витрата в водосховище, м ³ /с	Максимальна скидна витрата (м ³ /с) при похибці прогнозу			Найвищий рівень води в водосховищі біля греблі (м) при похибці прогнозу		
		+40%	0%	-40%	+40%	0%	-40%
0,01%	13260	10500	10500	10500	121,80	122,60	123,50

Як видно з таблиці 5.3, найменше форсування рівня води у водосховищі спостерігається при завищеному прогнозі. Це пояснюється тим, що в очікуванні більших, ніж при точному і заниженому прогнозі, витрат на початковій стадії паводків в нижній б'єф скидаються більші витрати, і відповідно, до більш низької відмітки було спрацьовано водосховище перед проходженням пікової частини паводків. Але у всіх випадках форсування рівня води у водосховищі відмітка була близька до проектного рівня, який дорівнює 123,00 м, і при якому проводились розрахунки гідротехнічних споруд Дністровського гідровузла на стійкість.

Регулювання паводків по «Методиці розрахунку пропуску паводків через дністровський гідровузол на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища» дозволяє зрізати максимальні витрати паводка 0,01% забезпеченості з 13260 м³/с до 10500 м³/с (рис.5.5), а у разі уточнення прогнозу кожні 4 години, максимально зменшити холості скиди (рис.5.6). Рівень форсування в Дністровському водосховищі не перевищує при цьому відмітки 123,50 м (при заниженому прогнозі). При цьому забезпечується зрізання паводку 1% забезпеченості з 5140 м³/с до 2600 м³/с, (рис. 5.7), як передбачено в проекті Дністровського гідровузла.

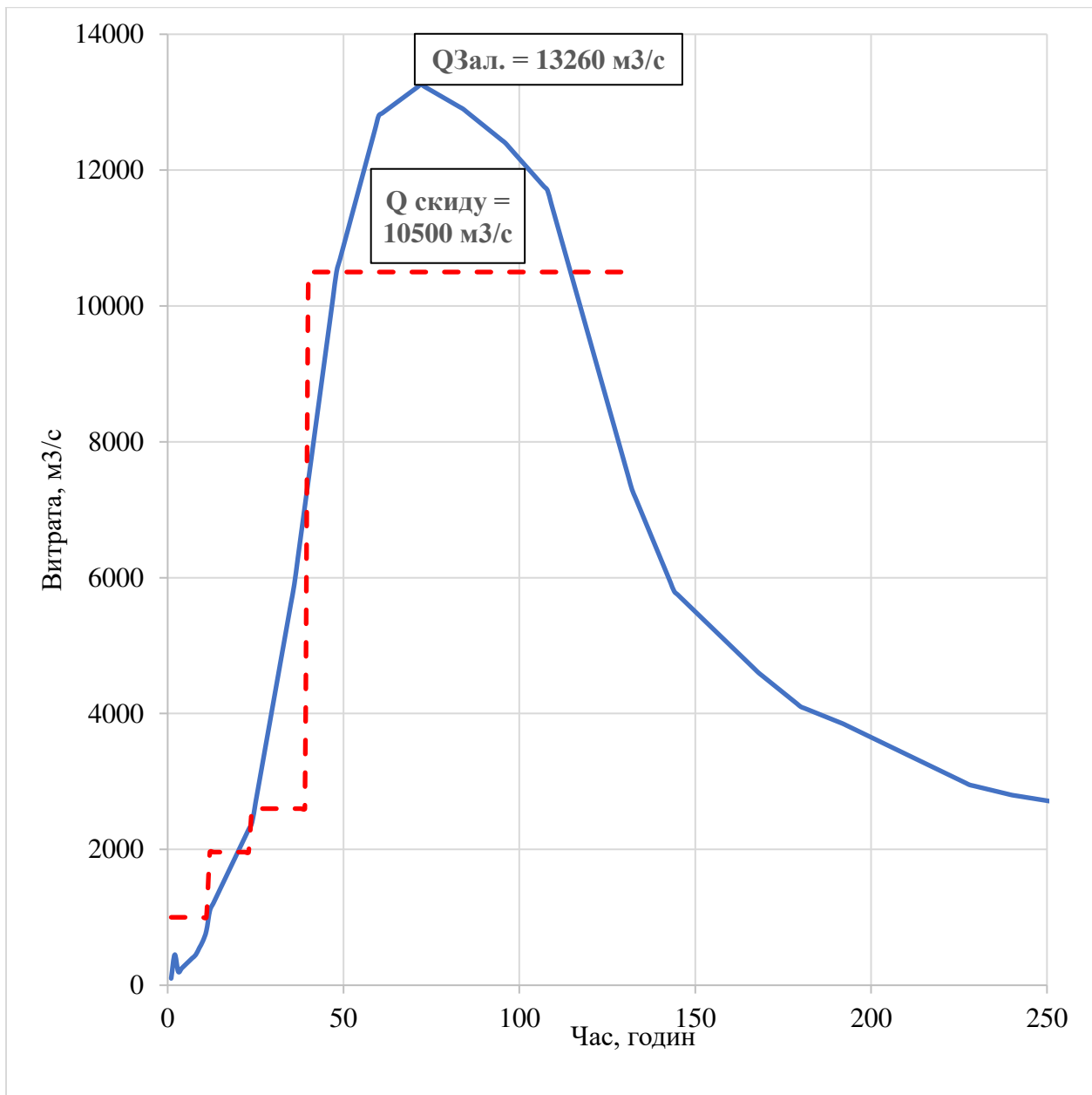


Рисунок 5.5 – Схема пропуску паводку 0,01% забезпеченості по запропонованій методиці з врахуванням прогнозу

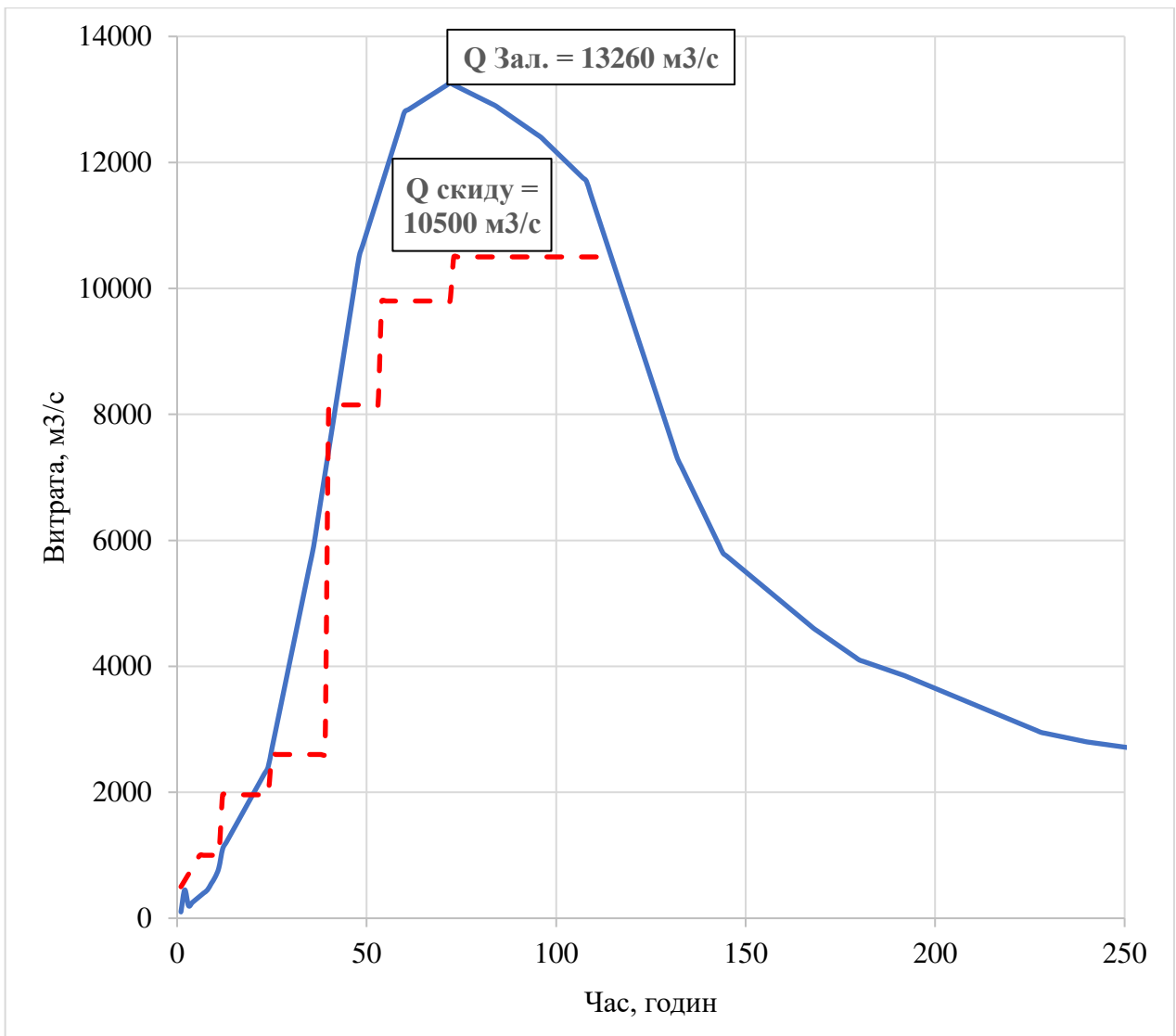


Рисунок 5.6 – Схема пропуску паводку 0,01% забезпеченості по запропонованій методиці та уточненням прогнозу кожні 4 години

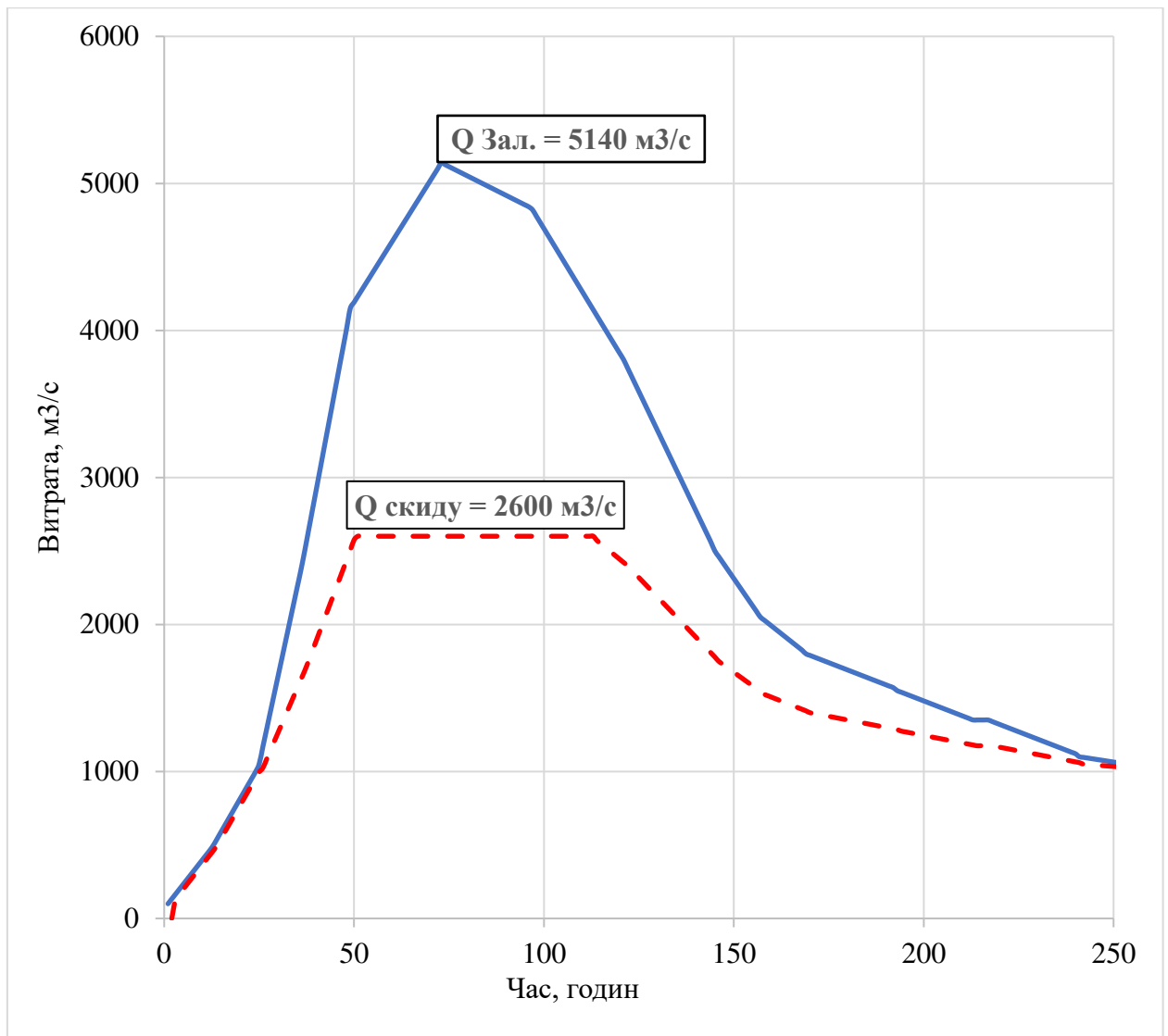


Рисунок 5.7 – Схема пропуску паводку 1% забезпеченості по запропонованій методиці з врахування прогнозу по гідлогічному посту Заліщики

5.3. Висновки

Алгоритм регулювання паводків по водосховищу на основі прогнозів приточності води дозволяє підготувати водосховище для зарегулювання великих об'ємів паводкових вод (шляхом попереднього спрацювання по зазначеним правилам в алгоритмі), з однієї сторони, та не спрацювати до граничних значень. Тим самим гарантується зрізання паводків різної забезпеченості.

Розроблений алгоритм регулювання паводків по Дністровському водосховищі враховує прогноз приточності води у водосховищі на підставі фактичних даних гідрологічних постів, які розташовані вище водосховища. Такий підхід дозволяє звести до мінімуму кількість невизначених вихідних даних і зрозуміти чутливість моделі до різних характеристик для адаптації моделі до конкретних гідрологічних особливостей досліджуваної річки.

Відмінною рисою запропонованого нового алгоритму регулювання паводків на водосховищі є врахування прогнозу приточності води у водосховище на підставі фактичних даних гідрологічних постів, які розташовані вище водосховища.

Виконано розрахунки трансформації паводку по водосховищу 0,01 % забезпеченості, максимальною витратою 13260 м³/с з застосуванням запропонованої методики розрахунку пропуску паводків через гідровузол на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища. По отриманим результатам розрахунку, зрозуміло, що запропонована методика гарантує зріз максимальних витрат з 13260 м³/с до 10500 м³/с у випадку проходження паводку 0,01 % забезпеченості (рис. 5.5), а для паводків більшої забезпеченості для прикладу 1 %, витратою 5410 м³/с гарантується зріз витрат до 2600 м³/с (рис.5.7). Результати розрахунку з застосуванням запропонованої методики вказують на те, що методика є дієвою.

Основною схемою пропуску паводків через Дністровський гідровузол повинна бути схема з використанням прогнозів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано огляд джерел, присвячених питанням дослідження паводків та умов його формування. Надана історична довідка проходження значних за своїми масштабами паводків у Карпатському регіоні, їх наслідки. Проведено аналіз методів і систем контролю та прогнозування рівня паводкових вод [41-72].

2. Детально вивчено і писано гідрологічні характеристики річки Дністер на досліджуваній ділянці та враховано в розрахунках.

3. Створена гідродинамічна модель руху паводкових вод на ділянці річки Дністер. Для побудови гідродинамічної моделі та здійснення подальших розрахунків застосовувались методи математичного моделювання гідравлічних параметрів. Дослідження проводились у програмному комплексі MIKE 11, який забезпечує можливість розрахунків неусталеного режиму потоку з використанням неявної краєво-різницевої схеми розрахунку для різних режимів потоку. В основу розрахунків покладено рішення повних нелінійних рівнянь Сен-Венана для потоків у відкритих розгалужених руслах.

За допомогою створеної гідродинамічної моделі стає можливим врахувати умови та характеристики виходу води на пойму та подальшого її повернення до водосховища після проходження максимальних паводкових витрат та пониженні позначок у головному руслі за досліджуваній період часу. Гідродинамічна модель визначає час добігання паводкових витрат від вхідного створу до створу гідровузла, що дає можливість здійснювати динамічні розрахунки, а не по статичним ємностям.

4. Здійснено верифікацію моделі фактичним паводком 24–31 липня 2008 року. Гідродинамічна модель, відтворює близькі до реальних умов характеристики досліджуваної ділянки річки та адекватно описує вплив паводкових вод на підняття рівнів у будь-якому поперечному перерізі досліджуваної ділянки річки та слугуватиме інструментом для подальших розрахунків та відтворення проходження паводків різної забезпеченості.

5. Проведено аналіз існуючих методів пропуску паводків. Аналіз існуючих методів пропуску паводкових вод показує, що важливим моментом при розрахунках пропуску паводків та повеней є врахування прогнозів. Це дає змогу підготувати водосховища до прийняття паводкових та повеневих вод. Таким чином можливо здійснити зменшення максимальних витрат у нижній б'єф та уникнення підтоплень прибережних територій нижче гідровузла.

6. У дисертаційній роботі поставлено і розв'язано науково-практичне завдання, що полягає в удосконаленні методик розрахунку пропуску паводків на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища.

Розроблений алгоритм регулювання паводків по Дністровському водосховищі враховує прогноз приточності води у водосховищі на підставі фактичних даних гідрологічних постів, які розташовані вище водосховища. Такий підхід дозволяє звести до мінімуму кількість невизначених вихідних даних і зрозуміти чутливість моделі до різних характеристик для адаптації моделі до конкретних гідрологічних особливостей досліджуваної річки.

Запропонована автором «Методика розрахунку пропуску паводкових вод через Дністровський гідровузол на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища» дає рекомендації по пропуску паводків різної забезпеченості, та гарантує зрізання максимальних витрат через Дністровський гідровузол шляхом завчасного спрацювання водосховища, та подальшого поступового його наповнення в момент добігання паводкової хвилі до Дністровського гідровузла.

Методика розрахунку пропуску паводкових вод через Дністровський гідровузол на основі прогнозів приточності води допоможе вирішувати наступні задачі:

- формувати короткострокові і довгострокові гідрологічні прогнози;
- комплексно аналізувати водозабезпечення у басейні р. Дністер;
- виконувати водно-енергетичні розрахунки і розрахунки оптимального виробництва електроенергії;

- розраховувати час добігання води від гідрологічного посту Заліщики до створу Дністровської ГЕС;
- будувати сценарії використання водних ресурсів та здійснювати розрахунки і порівняльний аналіз для умов маловоддя та паводку.

Обмеженням даного дослідження є те, що дані, які надходять з гідрологічних постів, на даний момент не автоматизовані, тому створення та доповнення гідродинамічної моделі займає багато часу, а при проходженні паводку потрібно оперативно виконувати розрахунки. Застосування даної методики можливе на середньонапірних гідроелектростанціях та на ріках-аналогах з подібними гідрологічними умовами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dottori F., Baldassarre G., Todini E. Detailed data is welcome, but with a pinch of salt: accuracy, precision, and uncertainty in flood inundation modelling. *Water Resour. Res.*, 49 (9) (2013), P.–60796085.
2. Song X., Zhang J., Zhan C., Xuan Y., Ye M., Xu C. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *J. Hydrol.*, 523 (2015), P. 739–757.
3. Ward P.J., Jongman B., Salamon P., Simpson A., Bates P., Groeve T., Muis S., Perez E.C., Rudari R., Trigg M.A., Winsemius H.C. Usefulness and limitations of global flood risk models *Nat. Clim. Change*, 5 (8) (2015), P. 712–715.
4. Hall J., Solomatine D. A framework for uncertainty analysis in flood risk management decisions. *Int. J. River Basin Manag.*, 6 (2) (2008), P. 85–98.
5. Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F., Ratto M. *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons (2014).
6. D.C. Mason, P.D. Bates, J.T. Dall'Amico. Calibration of uncertain flood inundation models using remotely sensed water levels *J. Hydrol.*, 368 (1) (2009), P. 224–236.
7. Hunter N.M., Bates P.D., Horritt M.S, Wilson M.D. Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: a review *Geomorphology*, 90 (2007), P. 208–225.
8. MIKE 11. User manual and technical references. DHI. 2016.
9. Грушевский М.С. Некоторые вопросы гидравлических расчетов для потоков в открытых руслах. Труды Академии водохозяйственных наук. Вып.3. Водные пути и русловые процессы. М.:1996.– С.174–192.
10. The Development and Application of the Urban Flood Risk Assessment Model for Reflecting upon Urban Planning Elements. Park, K (Park, Kiyong); Lee, MH (Lee, Man-Hyung), *WATER*, Volume: 11, Issue: 5, Article Number: 920, DOI: 10.3390/w11050920, Published: MAY 2019. Document Type: Article. http://cel.webofknowledge.com/full_record.do?product=CEL&search_mode=CitingA

articles&qid=4&SID=D6gh5cAGjK5Lbr3kxb6&pReturnLink=&pSrcDesc=&page=1
&UT=WOS:000459735100062&doc=3

11. Лобода Н.С. Влияние изменений климата на водные ресурсы Украины (моделирование и прогнозы по данным климатических сценариев) // Глобальные и региональные изменения климата под ред. Шестопалова В.М., Логинова В.Ф., Осадчего В.И. и др.). К.: Ніка-Центр, 2011.– С. 340–352.

12. Зорін Д.О. Кліматичні зміни протягом геологічної історії Землі / Д.О. Зорін // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. 2014. № 1 (9).– С. 29–48.

13. Адаменко О.М. Про можливості передбачення та запобігання катастрофічних паводків на річках Карпатського регіону / Адаменко О.М., Крижанівський Є.І. // В кн. :Мат-ли 5 наук.-прак. Конф. – К.:НПЦ Екологія. Наука. Техніка, 2009.– С. 17–20.

14. Швец Г. И. Выдающиеся гидрологические явления на юго-западе СССР / Г.И. Швец. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 512 с.

15. Кирилюк М. І. Водний баланс і якісний стан водних ресурсів Українських Карпат/ М. І. Кирилюк. – Чернівці : Рута. – 2001. – 246 с.

16. Панасенко А.В. Прогнозування гідроресурсів та планування водноенергетичних режимів каскадів ГЕС та ГАЕС з врахуванням кліматичних змін.//Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки Том 31 (70). № 6 Частина 2, 2020.

17. Кюнж Ж.А., Холли Ф.М., Вервей А. Численные методы в задачах речной гидравлики (практическое применение). М.: Энергоатомиздат, 1985. – 256 с.

18. Грушевский М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. Л.: Гидрометеиздат, 1982. –288 с.

19. Рябенко О.А. Розрахунки неусталених режимів роботи верхнього басейну ГАЕС / О.А. Рябенко, В.С. Тимошук // Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. – Рівне:НУВГП, 2011. – Вип. 2(54).– С. 79–85.

20. Бойко В.М., Петренко Л.В. Стан і проблеми оперативної гідрології в Україні. Наукові праці Укр.НДГМІ. – 2003. – Випуск 252.

21. Заміховський Л.М., Клопощук О.І. Аналіз методів і систем контролю та прогнозування рівня паводкових вод // Наука і сучасні технології // Нафтогазова енергетика. №2 (15), 2011. – 99 с.

22. Клапоущак О.І. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання [Текст] / О.І. Клапоущак // Сучасний стан контролю та прогнозування паводкових вод : 6-та Міжнародна науково-технічна конференція і виставка, Івано-Франківськ, 29 листопада – 2 грудня 2011 р.: тези доп. І повідомл. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 209–214.

23. Гинзбург Б.М., Борщ С.В., Ефремова Н.Д. Методы фонового долгострочного и среднестрочного прогноза сроков вскрытия рек ефропейской территории России. // Метеорология и гидрология, 2001, №1, с.67–78.

24. Dellepiane S. Coastline extraction from SAR images and a method for the evaluation of the coastline precision // De Laurentiis R., Giordano F. – Pattern Recognition Letters. – 2004. № 25. – P.1461–1470.

25. Скакун С.В. Нейромережевий метод картографування повеней на основі спутникових зображень / С.В. Скакун // Наукові праці Дон-НТУ. – 2001. – Вип. 10 (153). – с.52–58. – Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка».

26. Стефанишин Д.В. Використання методу екстраполяцій при прогнозуванні рівнів води в ріці, де відбувається трансформація русла, з врахуванням ризику / Д.В. Стефанишин, Ю.Д. Стефанидина // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво: зб. Наукових праць. – Рівне: НУВГП. – 2005.– Вип. 30 – С. 107–116.

27. Алита С.Л. Методы решения задач оперативного прогноза ливневых паводков по данным радиолокационных и наземных измерений осадков : автореф. Дис. На здобування канд фізико–математических наук : спец. 25.00.30

«Метеорология, климатология, агрометеорология» / С. Л. Алита. – Нальчик, 2010. – 18 с.

28. Анализ и прогнозирование паводков и наводнений. Описание решения. [Электронный ресурс] : Описание решения / НКФ Волга Начная консалтинговая фирма. Официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.volgaltd.ru/rus/solutions/solution/solution>.

29. Закарпатський інформаційно-діловий портал «Мукачево.net». Закарпатців від паводків захищатиме Берегівська польдерна система [Електронний ресурс]: Закарпатців від паводків захищатиме Берегівська польдерна система. / Державне агенство водних ресурсів України. Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.mukachevo.net/ua/News/view/>.

30. Басейнове управління водних ресурсів річки Тиса. [Електронний ресурс]: Державне агенство водних ресурсів України. Офіційний сайт. – Режим доступу: http://www.vodhosp.uzhgorod.ua/aivs_tisa.html.

31. Юлдашева К.А. Борьба с паводками : Обзор мирового опыта / К.А. Юлдашева // Информационный сборник. – Ташкент. – 2010 – Вып. 33. – С. 68.

32. MIKE 11. Компьютерное моделирование систем рек и каналов. Краткое руководство пользователя. Научная консалтинговая фирма “Волга” Москва, 2016 г.

33. Бритвин С.О., Беликов В.В., Милитеев А.Н., Прудовский А.М., Родионов В.Б. Компьютерное моделирование – современный инструмент решения задач речной гидравлики. Прогнозирование паводков в проекте «Волга-Рейн». Научно-технический и производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений». Вып.11. Гидрологическая безопасность и защита окружающей среды и населения от паводков. М.: 2003. – С. 126–131.

34. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.

35. Дністровська ГАЕС. Правила експлуатації водосховищ Дністровського каскаду ГЕС та ГАЕС. Гідрометричні і гідрографічні роботи з уточнення обсягу

дністровського та буферного водосховищ. Заключний звіт, 732/МЦДА2АТ112, ПАТ «Укргідропроєкт», м. Харків, 2013 р.

36. Оценка последствий образования водохранилищ и других аспектов водохозяйственной деятельности на окружающую среду и разработка мероприятий исключающих или ограничивающих неблагоприятное воздействие на экосистему Днестра. Материалы к организации информационной базы гидравлических данных р. Днестра на участке Днестровского водохранилища, 1047А7АТ46, Укргідропроєкт, Харьков, 1993 г.

37. Дністровська ГАЕС. Правила експлуатації водосховищ Дністровського каскаду ГЕС та ГАЕС. Водогосподарські, водноенергетичні та гідрологічні розрахунки. Гідрологічні розрахунки., 732-2-Т113, ПАТ «Укргідропроєкт», м. Харків, 2014 р.

38. Рогунович В.П. Автоматизация математического моделирования движения воды и примесей в системах водотоков. Л.: Гидрометеиздат. 1989. – 264 с.

39. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат. 1984. – 640 с.

40. Правила эксплуатации водохранилищ Днестровского комплексного гидроузла, 589-39-Т36, Москва, 1987 г.

41. Загальна гідрологія: підручник / В.К. Хільчевський, О.Г. Ободовський, В.В. Гребінь та ін.– К.: Видавничополіграфічний центр «Київський університет», 2008. – 399 с. ISBN 978-966-439-016-0.

42. Краковская С.В., Паламарчук Л.В., Шедеменко И.П., Дюкель Г.А., Гнатюк Н.В. Численный прогноз регионального климата Украины на основе сценариев возможных глобальных климатических изменений в XXI веке (Заключительный отчет). № гос. регистрации 0108U007657. – 2010. – 97 с

43. Сніжко С. Оценка изменения водного стока рек Украины на основе водно-балансовых моделей / С. Сніжко, І.Купріков, О.Шевченко // Фізична географія та геоморфологія. – 2012. – Вип..2 (66). – С. 157-161.

44. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 191 с.
45. Прудовский А.М. Наводнения и защита от них. Научно-технический и производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений». Вып.11. Гидрологическая безопасность и защита окружающей среды и населения от паводков. М.: 2003. – С. 3–6.
46. Киселев П.Г. Гидравлика. Основы механики жидкости. М.: Энергия. 1980.
47. Беликов В.В., Милитеев А.Н., Прудовский А.М., Родионов В.Б. Компьютерная гидравлическая модель речного бассейна – основа определения ущербов народному хозяйству от наводнений. Научно-технический и производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений». Вып.11. Гидрологическая безопасность и защита окружающей среды и населения от паводков. М.: 2003.–С.–132–147.
48. Прокофьев В.А. Моделирование последствий воздействия паводка на ГТС с помощью метода Нансок на регулярной сетке. Научно-технический и производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений». Вып.11. Гидрологическая безопасность и защита окружающей среды и населения от паводков. М.: 2003.
49. Організаційні, навчальні та науково-дослідницькі роботи на Дністровському протипаводковому полігоні у 2012–2013 рр./ Є. І. Крижанівський, О. М. Мандрик, Я. О. Адаменко [та ін.] // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування.–2014.–№ 1 (9).–С. 53–70.
50. Martinez J.M., Le Toan T. Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data // Remote Sensing of Environment. – 2007. – № 108. – P. 209–223.
51. Маланин В.В. Методы и практика анализа случайных процессов в динамических системах / В.В. Маланин, И.Е. Полосков. – М: Ижевск: НИЦ, 2010. – 295 с.
52. Олійник А. П. Математичне моделювання нестационарної фільтрації з

ціллю оцінки фізико-механічних властивостей ґрунтів в зоні трубопровода / А. П. Олійник, М. В. Панчук // *Методи і засоби технічної діагностики*. Івано-Франківськ, 1992. – С. 137 –140.

53. Олійник А.П. Дослідження впливу параметрів релаксації на збіжність чисельного методу послідовної верхньої релаксації для задачі Діріхле. / А. П. Олійник, Л. О. Штаєр // *Карпатські математичні публікації*. – 2012. – Т. 4, № 2. –С. 289 – 296.

54. Маслова Т.В. Оцінювання зволоженості гірських водозборів при математичному моделюванні дощових паводків / Т. В. Маслова, М. М. Сусідко // *Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія : 3 Всеукраїнська наукова конференція, 15 –17 листопада 2006 // Наук. праці УкрНДГМІ*. – Київ, 2006. – Вип. 256. – С. 233 – 238.

55. Соседко М.Н. Особенности применения математической модели формирования дождевого стока для расчёта паводков в горной местности / М. Н. Соседко // *Тр. УкрНИГМИ*. – М.:Гидрометеоиздат, 1980. – Вып. 181.– С. 59 – 73.

56. Леонтьев Н.С. Основы теории фильтрации :учеб. пос. / Н. С. Леонтьев. –М.:изд-во прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. – 88 с.

57. Хлапук М.М., Шинкарук Л.А. Протипаводкові акумулюючі ємності в басейні верхнього Дністра та мала гідроенергетика. – *Гідроенергетика України*, 2018.

58. Zamikhovskii L.M. The flood process mathematical modelling an their prediction methods based on static data / Zamikhovskii L.M., Oliinyk A.P., Klapoushchak O.I., Shtaiyer L.O. // *Life Science Journal*. – 2014. – № 11(8s). – P. 47–477. ISSN: 1097-8135 (Print) / ISSN: 2372-613X (Online); Impact Factor 2012: 0.165.

59. Клапоущак О.І. Методика побудови апроксимуючих кривих для оцінки і прогнозування рівня паводкових вод /О.І. Клапоущак // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – Харьков:Технологический центр, 2014. – № 2/4 (68) – С. 50–54. – ISSN:1729-3774.

60. Гурин В.А., Рябенко О.А. Вплив гідравлічних режимів на експлуатацію споруд і обладнання ГЕС та ГАЕС. – Гідроенергетика України, 2011.

61. Ивахненко А.Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей / А.Г. Ивахненко, Й.А. Мюллер –К.:Техника, 1985. – Берлин:ФЕБ Ферлаг Техник, 1984. – 223 с.

62. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель.– М.:Наука, Физматгиз, 1962.–564 с.

63. Дорошенко В. М. Основи наукових досліджень / В. М. Дорошенко. – Івано-Франківськ:Факел, 1993.–128 с.

64. Яковлева О.М. Рябенко. О.А. Побудова кривої спаду потоків із плавномінімним нерівномірним усталеним рухом з використанням приведенного закону зміни модуля витрат. – Гідроенергетика України, 2013.

65. Рябенко, А.А., Татаринцев, А.В., Семенуха, А.В. Пропуск паводков через Дністровський гідроузел на основі прогнозів приточності с учетом неустановившегося движения паводочной волны по водохранилищу. – Гідроенергетика України, 2016.

66. Хлапук М.М., Ясінська Л.Р., Феценко Л.В. Вплив гідравлічних параметрів потоку на пропускну здатність русла та заплави на передгірських ділянках річок. – Вісник НУВГП, 2016.

67. Extreme Floods and Droughts under Future Climate Scenarios. Markus, M (Markus, Momcilo); Cai, XM (Cai, Ximing); Sriver, R (Sriver, Ryan) WATER, Volume: 11, Issue: 8, Article Number: 1720, DOI: 10.3390/w11081720, Published: AUG 2019.

68. Spatial Dependence Modeling of Flood Risk Using Max-Stable Processes: The Example of Austria. Albrecher, H (Albrecher, Hansjorg); Kortschak, D (Kortschak, Dominik); Prettenthaler, F (Prettenthaler, Franz), View ResearcherID and ORCID, WATER, Volume: 12 Issue: 6, DOI: 10.3390/w12061805, Published: JUN 2020.

69. Impacts of Flooding and Flood Preparedness on Subjective Well-Being: A Monetisation of the Tangible and Intangible Impacts. Hudson, P (Hudson, Paul);

Botzen, WJW (Botzen, W. J. Wouter); Poussin, J (Poussin, Jennifer); Aerts, JCJH (Aerts, Jeroen C. J. H.), View ResearchID and ORCID, JOURNAL OF HAPPINESS STUDIES, Volume: 20 Issue: 2 Pages: 665-682, DOI: 10.1007/s10902-017-9916-4, FEB 2019, Type: Review.

70. Removing local extrema from imprecise terrains. Gray, Chris; Kammer, Frank; Loeffler, Maarten; et al. COMPUTATIONAL GEOMETRY-THEORY AND APPLICATIONS Volume: 45 Issue: 7 Pages: 334-349 Published: AUG 2012, Usage Count: 0 (Last 180 Days), 1 (Since 2013).

http://cel.webofknowledge.com/InboundService.do?product=CEL&Func=Frame&SrcApp=Publons&SrcAuth=Publons_CEL&SID=D3tlG156uSgsfbKzHZv&customerSID=Publons_CEL&smartRedirect=yes&mode=CitingArticles&IsProductCode=Yes&Init=Yes&viewType=summary&action=search&UT=WOS%3A000279431800007

71. The behavioral turn in flood risk management, its assumptions and potential implications. March 2020 Wiley Interdisciplinary Reviews: Water 7(2). DOI: 10.1002/wat2.1418, https://www.researchgate.net/publication/339804466_The_behavioral_turn_in_flood_risk_management_its_assumptions_and_potential_implications

72. Water use in electricity generation for water-energy nexus analyses: The European case, Larsen, MAD (Larsen, Morten Andreas Dahl); Drews, M (Drews, Martin). View ResearchID and ORCID. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT. Volume: 651 Pages: 2044-2058 Part: 2., DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.045, FEB 15, 2019.

ДОДАТКИ

Додаток А

ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
"УКРГІДРОЕНЕРГО"

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. генерального директора
ПрАТ «Укргідроенерго»

Б. Л. Сухецький



АКТ

про впровадження наукових результатів дисертаційного дослідження Панасенко Анни Володимирівни на тему: «Удосконалення методів розрахунків пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли з урахуванням характеристик паводкової хвилі»

Комісія у складі директора департаменту з комерції ПрАТ «Укргідроенерго» Олефіра Дмитра Олександровича, директора департаменту супроводження комерційної діяльності ПрАТ «Укргідроенерго» Рохварга Олександра Давидовича та керівника групи прогнозування гідроресурсів, відділу прогнозування, аналізу та звітності ПрАТ «Укргідроенерго» Панасенко Анни Володимирівни цим Актом засвідчує, що основні наукові результати та рекомендації дисертаційної роботи Панасенко А. В. застосовуються при прогнозуванні та оптимізації використання гідроресурсів через Дністровський гідровузол з метою планування роботи ГЕС та ГАЕС Товариства на ринку електричної енергії, особливо в паводковий період. Планується, що в подальшому розроблені рекомендації та отримані на їх основі напрацювання, а також побудовані моделі будуть використані при створенні автоматизованої системи управління гідроресурсами (Water Management System).

Економічний ефект від впровадження зазначених рекомендацій буде визначено в подальшій роботі.

директор департаменту з комерції

Д. О. Олефір

директор департаменту супроводження
комерційної діяльності

О. Д. Рохварг

керівник групи прогнозування гідроресурсів
відділу прогнозування, аналізу та звітності
департаменту з комерції

А. В. Панасенко

25 лютого 2021 р.

Додаток Б

Список опублікованих праць

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Рябенко О.А., Татарінцев О.В., Семенуха А.В. Гідравлічний режим в нижньому б'єфі Каховської ГЕС після будівництва ГЕС-2 при добовому регулюванні потужності. *Вісник НУВГП. Технічні науки*: зб. наук. праць. Рівне, 2015. Випуск 3(71). С. 221–226.

2. Рябенко А.А., Татарінцев А.В., Семенуха А.В. Пропуск паводков через Дністровський гідрозел на основі прогнозів приточності з урахуванням неустановившогося руху паводочної хвилі по водохранилищу. *Гідроенергетика України*. Київ, 2016. №1–2. С. 62–66.

3. Панасенко А.В. Прогнозування гідроресурсів та планування водноенергетичних режимів каскадів ГЕС та ГАЕС з врахуванням кліматичних змін. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Том 31(70). № 6 Частина 2, С. 178–181.

4. Панасенко А.В., Сунічук С.В. Пропуск паводків нормативної забезпеченості через Дністровський гідрозел на основі прогнозів приточності. *Вісник НУВГП*. Рівне, 2020. Випуск 4(92). С. 3–11.

5. Панасенко А.В. Удосконалення методів розрахунків пропуску паводкових вод через середньонапірні гідрозели з урахуванням характеристик паводкової хвилі. *Електронне моделювання, Національна академія наук України, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова*. Київ, 2021. Том 43(2). С. 98–108.

Статті у наукових фахових виданнях України, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection або Scopus:

6. Olefir D.O., Panasenko A.V. Methods of forecasting and planning of water resources and redistribution of runoff costs on the example of passing the flood. Методика прогнозування та планування водних ресурсів та перерозподіл стокових витрат. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. No

2(110) (2021): Hydropower. p. 6–12. ISSN 1729-3774. Scopus
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228561>

Публікації у матеріалах науково-технічних конференцій:

7. Семенуха А.В. Гидравлический режим в нижнем бьефе Каховской ГЭС после строительства ГЭС-2 при суточном регулировании мощности. Доклады и тезисы. Девятая научно-техническая конференция «Гидроэнергетика Новые разработки и технологии» (22–24 октября 2015 г., г. Санкт-Петербург). С. 76.

8. Семенуха А.В. Гідравлічний режим в нижньому б'єфі Каховської ГЕС після розширення (створення ГЕС-2) при добовому регулюванні потужності. 14-а міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону», Проблеми охорони та раціонального використання. Львів, 2015. С. 121–128.

9. Семенуха А.В. Пропуск паводков через Днестровский гидроузел на основе прогнозов приточности с учетом неустановившегося движения паводочной волны по водохранилищу, Гидроэнергетика Новые разработки и технологии, Издательство АО «ВНИИГ» им. Б.Е.Веденеева, г. Санкт-Петербург, 2016 г., С. 128–133.

10. Панасенко А.В. Пропуск паводків нормативної забезпеченості через Дністровський гідровузел на основі прогнозів приливності. 15-а міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону», Проблеми охорони та раціонального використання. Львів, 2016. С.196–199.