ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СОФИЯ

Том Volume 56 2023 Брой Issue 2

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY SOFIA

Получена: 30.12.2022 г.
Приета: 21.03.2023 г.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАДЛЪЖНИЯ ПРОФИЛ НА ВОДНАТА ПОВЪРХНОСТ НА ВОДОХРАНИЛИЩА

Р. Анева[1]

Ключови думи: *хидрографски измервания, крива на подпора, завирени обеми, залети площи*

РЕЗЮМЕ

В статията са разгледани въпроси, касаещи точността на определяне на залетите площи и завирените обеми на водохранилища, вследствие от влиянието на кривата на подпора. Разгледани са основни хидравлични формули за изчисляване на големината на подпора и е анализирана възможността за тяхното приложение. Изтъкнат е единственият надежден начин за определяне на кривата на подпора, а именно чрез прецизна геометрична нивелация. Предложен е метод на GPS нивелацията, като експериментално е изследвана пригодността му за определяне големината на подпора. Предложен е критерий за оценка на влиянието на кривата на подпора върху завирените обеми и са направени препоръки за условията на измерване, при които кривата на подпора е незначителна и не оказва съществено влияние при определяне на завирените обеми и залетите площи.

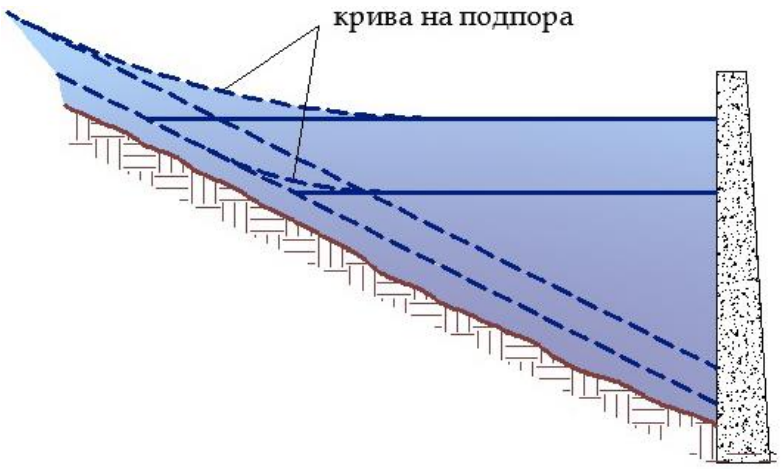
1. Въведение

Стойностите на завирените обеми и залетите площи се изчисляват чрез пресичане на ЦМ на дънния релеф на язовирната чаша с хоризонтални равнини през определен интервал по височина, което предполага, че водната повърхност на водохранилището се приема за еквипотенциална нивоповърхнина с една и съща кота. Това би било вярно, ако водната повърхност се намира в пълен покой, т.е. ако отсъства влиянието на каквито и да

[1] Румяна Анева, гл. ас. д-р инж., кат. „Приложна геодезия“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: aneva_fgs@uacg.bg

било смущаващи фактори като вариации в силата на земното притегляне, движението на водния поток и различните хидравлични ефекти, свързани с това.

Съобразно законите на речната хидравлика [3] равномерното движение на водата по долината на реката се характеризира с наклон на водната повърхност *I*, равен на наклона на дъното *i* (*I* = *i*). Намаляването на скоростта на течението на реката се наблюдава при вливането ѝ във водохранилището. Тази промяна в скоростта се наблюдава най-вече при пълноводие или наводнения. В този случай дълбочината се увеличава по направление на течението, а наклонът на водната повърхност намалява спрямо наклона на дъното (*I* < *i*). Кривата на свободната водна повърхност се нарича крива на подпора (фиг. 1).



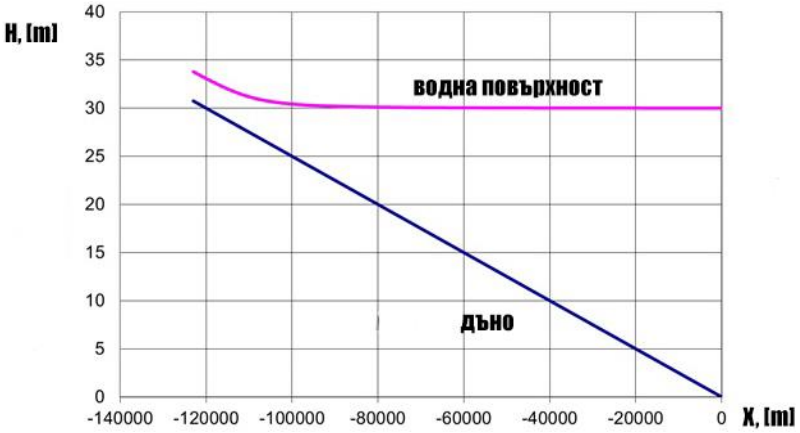
Фиг. 1. Крива на подпора

Наличието на крива на подпора в едно водохранилище по принцип би повлияло както върху завирените обеми, така и върху залетите площи. Ето защо, при обновяването на ключовите криви, на всеки един от значимите язовири в България е необходимо да се направи изследване за наличие на крива на подпора и влиянието ѝ върху ключовите криви.

2. Хидравлични методи за определяне на големината на кривата на подпора

Авторът е анализирал основни хидравлични формули за определяне на параметрите на подпора [1, 4]. Въз основа на анализа на тези формули и направените с някои от тях експерименти е установено, че те са трудно приложими, поради неопределеност на някои от аргументите в тях, като скоростния коефициент, средния разход за живо сечение и други.

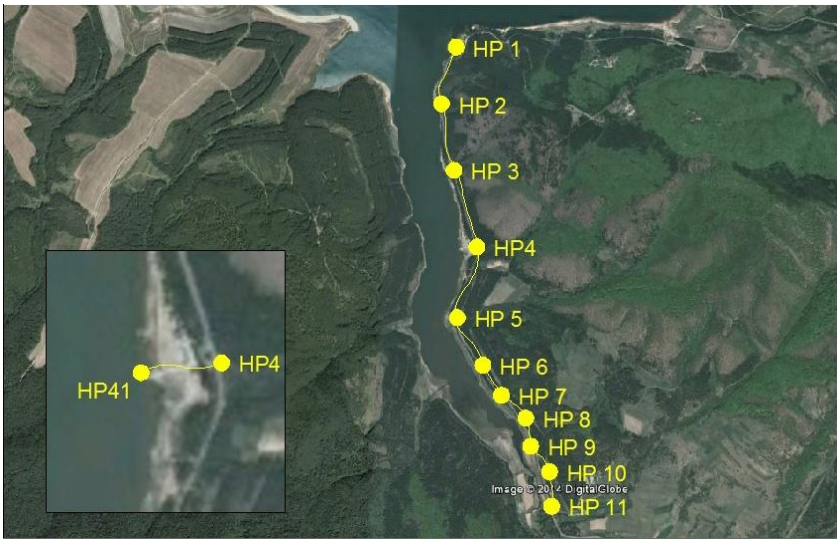
В други литературни източници като [5 – 7] се предлагат формули за определяне големината на подпора при различни видове движение на водния поток. Например в [6] се предлагат алгоритми и софтуер за изчисляване на кривата на подпора, с входни данни: наклон на дъното, коефициент на Шези за грапавина, разход на вода за средно живо сечение, след което с въведените данни се изчисляват хидравличните параметри на кривата на подпора при нормално и критично водно течение. При зададена начална точка, дълбочина и стъпка, се изчисляват линията на дъното и кривата на подпора (фиг. 2).



Фиг. 2. Линия на дъното и крива на подпора

От експерименти, направени от автора с този алгоритъм, е установено, че резултатите от моделирането силно се влияят от стойностите на коефициента на грапавина и стойностите на речния отток във водохранилището. Вследствие на това използването на тези формули и алгоритми също е силно затруднено, поради неопределеност на споменатите аргументи. Това в още по-голяма степен се отнася за значителна част от водохранилища в България, на които няма изградени хидроложки станции, съответно липсват надеждни статистически данни за речния отток.

3. Изследване на кривата на подпора чрез геодезически методи



Фиг. 3. Схема на нивелачните репери по ръкава на р. Шипочанска

Единственият надежден, макар и много трудоемък, начин за изследване на крива на подпора е чрез геодезически методи. Кривата на подпора може да бъде установена

експериментално с помощта на прецизна геометрична нивелация. Подобно измерване е направено от автора през август 2013 г. на част от акваторията на язовир „Искър“, по дължината на ръкава на р. „Шипочанска“. За целта по пътя към гр. Самоков са стабилизирани 2 нивелачни репери на разстояния 1500 m в първия участък от нивелачния ход, 2 на разстояние 500 m във втората част и два на разстояние 250 m в последната част на хода. Общата дължина на нивелачния ход е 3 km. Превишенията между реперите са определени с прецизна геометрична нивелация II клас (фиг. 3).

Поради липса на държавни нивелачни репери в района котите на реперите от положения ход са изчислени в локална височинна система с изходен нивелачен репер № 2 с кота 820,00 m. В измерените превишения не са нанасяни корекции за неуспоредност на ниво-повърхнините. От всеки нивелачен репер по най-късия път чрез геометрична нивелация IV клас е измерено превишението до водната повърхност. За да се отчете промяната на водното ниво по време на измерването, котата на водната повърхност в изходния нивелачен репер е определена още веднъж, след приключване на всички измервания. Получената разлика от 12 mm е разпределена върху котите на останалите точки от водната повърхност пропорционално на времето.

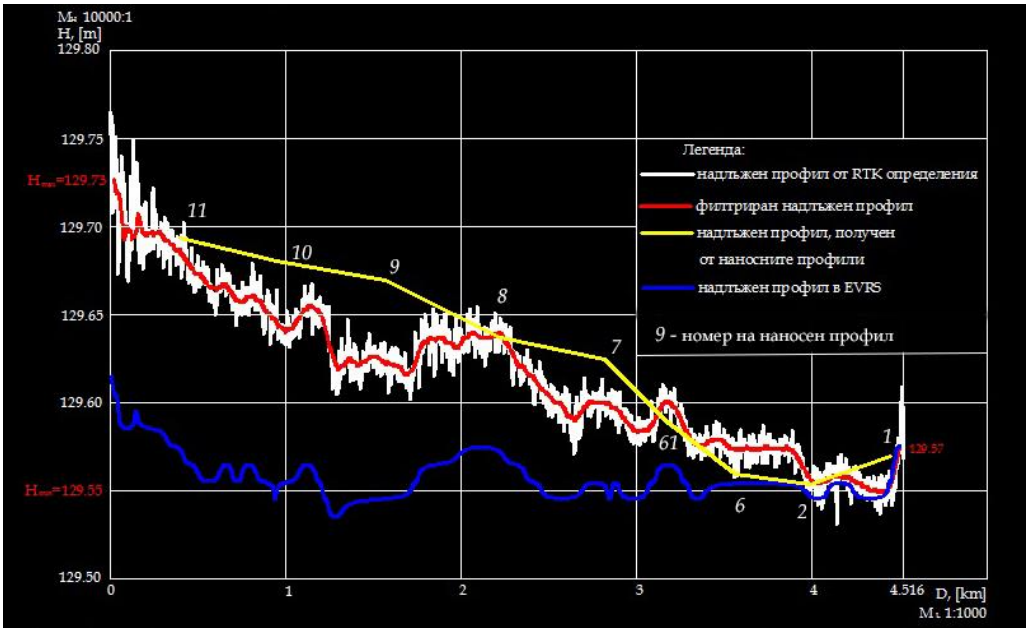
Таблица 1. Определяне на наличие на крива на подпора

Водно ниво	Кота, [m]	Време на определяне	Поправка, [mm]	Коригирана кота, [m]
HP 21	814,459	12:05	0	814,459
HP 51	814,459	13:13	3,1	814,462
HP 71	814,465	13:55	5,0	814,470
HP 91	814,458	14:40	7,1	814,465
HP 101	814,462	15:34	9,5	814,472
HP 111	814,466	16:02	10,8	814,477

В резултат на направения експеримент е установена разлика във височините на водното ниво между крайните точки 18 mm, което недвусмислено показва наличието на крива на подпора (табл. 1).

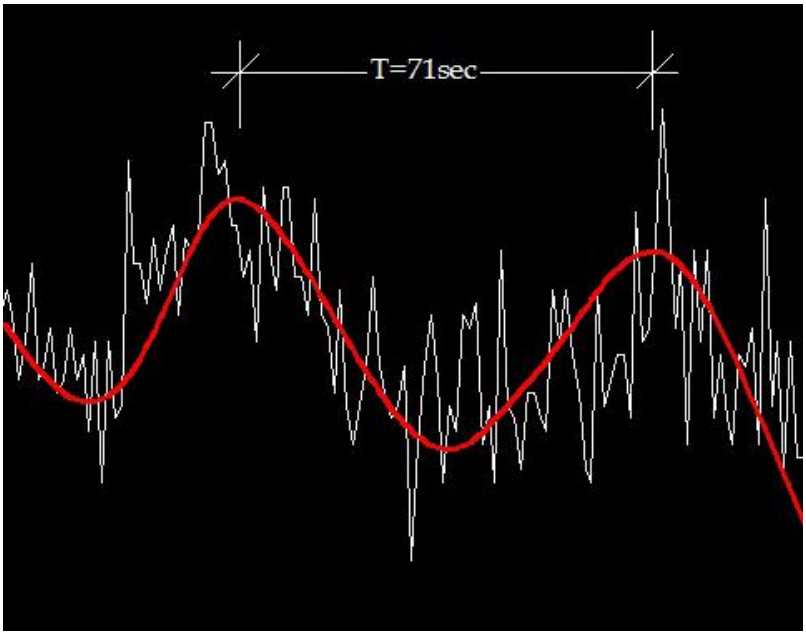
С използването на този метод може да се определи кривата на подпора с много висока точност. Трябва да се отбележи, че методът е много трудоемък, като в някои случаи е практически неприложим, например при тежки теренни условия, в планински райони със залесени склонове, при липса на пътен достъп. Ето защо от автора е изследвана възможността за използване на GPS нивелация, като много по-бърз начин за установяване на наличието на крива на подпора на водохранилища, където използването на геометрична нивелация е невъзможно.

През септември 2014 г. е направен експеримент на язовир „Ясна поляна“ с цел локализиране на кривата на подпора, с помощта на GPS нивелация. Измерен е надлъжен профил на водната повърхност от опашката на язовира до стената с помощта на кинематични GPS определения в режим RTK, реализирани с GPS приемници Leica System 1200, със собствена перманентна станция. Измерванията са извършени при спокойна водна повърхност, средна скорост на плавателния съд 2 m/s и записи през интервал 1 s. Височинните определения са със средни квадратни грешки в интервал от 0,5 до 4 cm. Графиката на реализацията на надлъжния профил в елипсоидни височини е показана на фиг. 4.



Фиг. 4. Надлъжен профил на водната повърхност

Флуктуациите на височинните определения по линията на профила могат да се разглеждат като шумова компонента, насложена върху полезния сигнал (надлъжния профил на водната повърхност), която съгласно условията на експеримента е плавна крива.



Фиг. 5. Филтрирана линия на надлъжния профил на водната повърхност

От анализа на графиката на фиг. 4 може да се предположи, че височинните флуктуации са реализация на случаен квазипериодичен процес със среден период около 15 s. Ето защо за обработка на измерванията, респективно отделянето на шума от полезния сигнал, е използван нискочестотен филтър с времева константа τ = 39 s. Резултатите от изглаждането са показани на фиг. 4 с червен цвят.

При свободна водна повърхност, предвид наличието на подпор както при язовирната стена, така и в опашката на водохранилището, линията на надлъжния профил би следвало да е вдлъбната крива от параболичен вид.

От графиката на фиг. 5 се вижда, че филтрираната линия на надлъжния профил съдържа вълнови компоненти, с период около 71 s, за който няма обяснение от хидравлично естество, тъй като измерванията са проведени при спокойна водна повърхност и няма основание за наличие на сейши във водохранилището. Може да се предполага, че това са по-дългопериодични флуктуации на височинните определения, забелязани по принцип при кинематичен режим на работа. Това се потвърждава от сравнението на котите на пресечните точки на надлъжния профил и линиите на наносните профили (1, 2, …, 11 от фиг. 4), които са от порядъка на 0,5 до 4,5 cm. Кота водно ниво в линиите на профилите е определена чрез среднотежестно от кинематичните определения, извършени при измерване на наносните профили, в същия ден при едно и също регистрирано водно ниво на водомерния пост. Трябва да се отбележи, че измерванията по профилите са извършени през интервал от 1 s в продължение на 5 – 15 min, т.е. използвани са от 300 до около 900 измервания в профил.

След изчистването на шумовите компоненти от надлъжния профил в елипсоидни височини се установява наличието на крива на подпора с големина $\Delta h = 18$ cm. За анализ на влиянието ѝ върху завирените обеми и залетите площи е необходимо преминаване в нормални или динамични височини. Направена е трансформация на елипсоидните височини на профила в европейската вертикална референтна система EVRS [2], с точност от порядъка на ± 5 cm. Тази точност не е достатъчна за целта на експеримента, но въпреки това от графиката на надлъжния профил (синята линия от фиг. 4) се установява устойчива тенденция на повишаване на водното ниво към опашката на язовира ($\Delta h = 6$ cm) и в района на язовирната стена, около 2 cm.

За оценка на влиянието на кривата на подпора върху завирените обеми е предложен следният критерий:

$$\Delta V_{\text{подпор}} \le \frac{m_V^{\text{доп}}}{t}, \qquad (1)$$

където $t = 2,3$ е нормираната случайна величина;

$\Delta V_{\text{подпор}}$ – завирeният обем, заключен между действителната водна повърхност и хоризонталната равнина, с височина водния стоеж при водомерния пост на водохранилището, изчислени при НВРВН (най-високо работно водно ниво);

$m_V^{\text{доп}}$ – допустимата грешка при определяне на завирения обем. $\Delta V_{\text{подпор}}$ се изчислява приблизително в зависимост от конфигурацията на водохранилището, чрез височината на подпора и площта на частта от водохранилището с установен подпор. При изчисляване на $\Delta V_{\text{подпор}}$ трябва да се има предвид, че това представлява сумарният обем на подпора при опашката и стената на водохранилището. Ако при НВРВН е изпълнено условието (1), то не е необходимо нанасяне на корекции върху завирените обеми, заради кривата на подпора, и може да се работи с обемите, отчетени от съответната ключова крива.

4. Изводи и препоръки

Въз основа на направените експерименти и техния анализ могат да се направят следните препоръки относно установяване на кривата на подпора при водохранилищата и отчитане на нейното влияние върху точността на завирените обеми:

- Хидравлични формули за определяне на параметрите на подпора могат да се използват за получаване на предварителна информация за кривата на подпора при различни водни нива и внимателно подбрани с помощта на специалисти по хидравлика стойности на участващите в тях параметри.

- Предвид трудоемкостта на геометричната нивелация и необходимостта от пътен достъп до водната линия, този метод може да се използва по-скоро като контролен в опашката на водохранилищата, в зоната на вклиняване на кривата на подпора във водната повърхност и при язовирната стена, където се появява обратна крива, причинена от подприщването при стената.

- По-висока точност при определяне на кривата на подпора, макар и в ограничен брой точки от нея, може да се постигне чрез обработка на кинематичните GPS определения, извършени по време на измерване на наносните профили, тъй като за целта се използват стотици определения на една и съща величина – водното ниво в съответния профил. Също така, за постигане на по-висока точност е необходима и по-прецизна височинна трансформация. За оценка на влиянието на кривата на подпора върху завирените обеми е предложен критерий (1), съобразен с допустимата грешка при тяхното определяне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Berkovich, K.* Ruslovye processy na rekakh v sfere vlijanija vodokhranilishh. Moskovskijj gosudarstvennyjj universitet, Moskva, 2012, ISBN 978-5-89575-202-9.

2. *Georgiev, Iv., Belyashki, T. i dr*. Rializatsia na evropeykata zemna koordinatna sistema ETRS89 i evropeyskata vertikalna referentna sistema EVRS na teritoriyata na Bulgaria. Geomedia, 2010, poseten na 14.09.2022 g.

3. *Savichev, O. G., Krasnoshhjokov, S. Ju., Nalivajjko, N. G*. Regulirovanie rechnogo stoka. GOU VPO „Nacional'nyjj issledovatel'skijj Tomskijj politekhnicheskijj universitet“, 2009, ISBN 5-98298-455-8.

4. Spravochnik geodezista, Nedra, Moskva, 1975.

5. *Hager, W*. Wastewater Hydraulics – Theory and Practice, Springer, Switzerland, 2010, ISBN 3642114849, 9783642114847.

6. *Parker, G*. 1D Sediment Transport Morphodynamics, University of Illinois, 2004.

7. *Subhash, J*. Open-channel flow, John Wiley & Sons, 2000, ISBN 0-471-35641-7.

STUDY ON THE LONGITUDINAL PROFILE OF THE WATER SURFACE OF RESERVOIRS

R. Aneva[1]

Keywords: *hydrographic measurements, backwater curve, flooded areas and volumes*

ABSTRACT

The paper deals with questions concerning the accuracy of determining the flooded areas and the volumes due to the influence of the backwater curve. Basic hydraulic formulas for calculating the size of the backwater curve are considered and the possibility of their application is analyzed. The only reliable way to determine the backwater curve is highlighted, namely by precise geometric leveling. A method of GPS leveling is proposed, and its suitability for determining the size of the support is experimentally investigated. A criterion for evaluating the influence of the backwater curve on the flooded volumes is proposed and recommendations are made for the measurement conditions in which the backwater curve is insignificant and does not have a significant impact on the determination of the flooded volumes and flooded areas.

[1] Rumyana Aneva, Assos. Prof. Dr. Eng., Dept. "Applied Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: aneva_fgs@gmail.com