

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОДНОСТІ РОКУ НА ЗОВНІШНІЙ ВОДООБМІН В РОБОЧОМУ ОБ'ЄМІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Є.В. Обухов, д-р екон. наук, канд. техн. наук, професор, акад. МАНЕБ, УВ (Одеса)

65039, вул. Середньофонтанська, 30-а, м. Одеса, Україна.

Однією із сучасних проблем функціонування водосховищ є зміна їх параметрів у процесі тривалої експлуатації та мінливість клімату. Оцінка стану водних об'єктів і процесів, які відбуваються в них, вимагають постійного моніторингу та аналізу. Мета роботи автора – дослідження інтенсивності зовнішнього водообміну на Каховському водосховищі, його горизонтальної та вертикальної складових, а також господарського використання об'єкта. На основі воднобалансових складових досліджено інтенсивність зовнішнього водообміну в корисному об'ємі водосховища в проєктних його параметрах з урахуванням водності року за весь період його експлуатації: багатоводний 1970 рік, маловодний 1972 рік, дуже маловодний 2015 рік, а також середньобагаторічний період за 1966–2017 роки його експлуатації. Дослідження щодо корисного об'єму водосховища визначають більш реальну динаміку та можливості експлуатації робочої частини водойми. Визначено коефіцієнти інтенсивності й показники зовнішнього водообміну по кожному місяцю року і місяці з максимальною і мінімальною інтенсивностями зовнішнього водообміну в часових одиницях, основний фактор впливу на нього – бічну приточність у водосховище. Максимальна інтенсивність зовнішнього водообміну у водосховищі в дуже маловодному році у весняний та осінній періоди його експлуатації погіршилася порівняно з багатоводним роком у три з половиною і три рази. Встановлено, що чим більше коефіцієнт інтенсивності зовнішнього водообміну, тим менше показник зовнішнього водообміну в часових одиницях й інтенсивніше відбувається зміна і самоочищення води у водосховищі. Якщо показник зовнішнього водообміну менше одиниці, то зміна нормативних водних ресурсів водосховища відбуватиметься менше ніж за рік. Результати досліджень можуть бути корисними для розробки режимів експлуатації водосховища в умовах зміни клімату. Бібл. 6, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: водосховище, водний баланс, водообмін, інтенсивність, коефіцієнт.

A STUDY OF THE INFLUENCE OF RIVERS ON THE EXTERNAL WATER EXCHANGE IN WORKING VOLUME OF THE KAKHOVSKY RESERVOIR

E. Obukhov, doctor of economic sciences, candidate of technical sciences, professor, academician of IAEMLP, Ukraine Department (Odessa)

65039, 30-a Serefontanska St., Odessa, Ukraine.

One of the current problems of reservoir functioning is climate variability and changes in their parameters during long-term operation. Assessment of the state of water bodies and the processes that occur in them require constant monitoring and analysis. The purpose of the author's work is to study the intensity of external water exchange at the Kakhovskiy reservoir, its horizontal and vertical components, as well as the economic use of the object. Based on the water balance components, the intensity of external water exchange in the useful volume of the reservoir in its design parameters is studied, taking into account the water content of the year for the entire period of its operation: high-water 1970, low-water 1972, very low-water 2015, as well as the average multi-year period for 1966-2017 years of its operation. Studies of the useful volume of the reservoir determine a more realistic dynamics and possibilities of operating the working part of the reservoir. The coefficients of intensity and indicators of external water exchange for each month of the year and the month with the maximum and minimum intensity of external water exchange in time units are determined, the main factor influencing it is the lateral inflow to the reservoir. The maximum intensity of external water exchange in the reservoir in a very low-water year during the spring and autumn periods of its operation worsened by three and a half and three times compared to a high-water year. It is established that the higher the coefficient of intensity of external water exchange, the lower the indicator of external water exchange in time units and the more intense the change and self-purification of water in the reservoir occurs. If the indicator of external water exchange is less than one, then the change in the standard water resources of the reservoir will occur in less than a year. The results of the research can be useful for developing reservoir operation modes in the context of climate change. Bybl. 6, table. 1, fig. 8.

Keywords: water reservoir, water balance, water exchange, intensity, ratio.

© Є.В. Обухов, 2021



С.В. Обухов
E. Obukhov

Відомості про автора: Доктор економічних наук, кандидат технічних наук, професор, академік МАНЕБ, УВ, Одеса

Освіта: Одеський інженерно-будівельний інститут, інженер-гідротехнік, спеціальність «Гідротехнічне будівництво річкових споруд і гідроелектростанцій»

Наукова сфера: техніко-економіко-екологічні проблеми в гідроенергетиці

Публікації: 246, 9 монографій

ORCID: 0000-0002-0726-5736

Контакти: тел./факс: +38(048)776-18-85

e-mail: ev.obukhov@gmail.com

Author information: Doctor of economics, candidate of technical Sciences, professor, academician of IAEMLP, Ukraine Department, Odessa

Education: Odessa Civil Engineering institute, engineer-hydraulics, specialty "Hydraulic engineering of river structures and hydroelectric power plants"

Research area: Technical-economic-environmental problem in hydropower

Publications: 246, 9 monograph

ORCID: 0000-0002-0726-5736

Contacts: phone/fax: +38(048)776-18-85

e-mail: ev.obukhov@gmail.com

Перелік використаних позначень та скорочень:

ГЕС – гідроелектростанція;

НПР – нормальний підпірний рівень;

Wп – проектний повний об'єм водосховища;

Wк – проектний корисний об'єм водосховища;

МВт – мегават;

кВт·г – кіловат-годин;

Сбр – середньобагаторічний.

Вступ і постановка проблеми. Однією із сучасних проблем функціонування водосховищ є зміна їх параметрів у процесі тривалої експлуатації та мінливість клімату.

Водообмін у водосховищах є однією з найважливіших характеристик їх стану [1–10]. На зовнішній і внутрішній водообмін, на вміст розчинених речовин у водоймах, на якість води, на інтенсивність цвітіння води у водосховищах степової зони при накопиченні в них хімічних або біологічних речовин значно впливає взаємодія гідрологічних і гідродинамічних процесів.

Відомі вчені досліджували процеси водообміну в озерах і штучних водоймах, і отримали характеристики водообміну багатьох водосховищ.

Метою даної роботи є дослідження інтенсивності зовнішнього водообміну в корисному об'ємі Каховського водосховища в проектних його параметрах з урахуванням водності року експлуатації, середньобагаторічної водності за 52 роки, горизонтальної та вертикальної складових водообміну, а також його господарського використання і зіставлення отриманих результатів з розрахованими раніше [6,7] аналогічними показниками для помісячно заповненого водосховища з урахуванням його мертвого об'єму (рис.1).

Основними матеріалами дослідження є реальні воднобалансові показники по Каховському водосховищу за багатоводний 1970 рік з об'ємом річного руслового припливу 86,08 км³, маловодний 1972 рік – 32,09 км³ і дуже маловодний 2015 рік – 21,8 км³, а також середньобагаторічні воднобалансові дані за 1966–2017 роки.

Каховське водосховище – шостий ступінь у складі Дніпровського каскаду, на якому здійснюється сезонне і частково багаторічне регулювання стоку.

Каховське водосховище розташоване на території Запорізької, Дніпропетровської та Херсонської областей. Площа водозбору – 482 000 км². Середньобагаторічний стік – 52,2 км³.

Проектна встановлена потужність ГЕС – 351 МВт, середньорічне вироблення електроенергії – 1420 млн кВт·год на рік.

Проектні повна і корисна ємність водосховища – відповідно 18,2 і 6,8 км³. Площа його при позначці нормального підпірного рівня – 2155 км², при рівні мертвого об'єму – 1930 км². Довжина водосховища – 230 км, максимальна ширина – 25 км, середня ширина – 9,3 км, максимальна глибина – 36 м, середня – 8,4 м. Площа мілководь водосховища – 110 км².

Максимальний статичний напір – 15,5 м, мінімальний – 8,4 м, розрахунковий – 9,85 м.

Розрахункова витрата водоскидної греблі – 15438 м³/с, розрахункова максимальна скидна витрата через споруди ($p = 0,1 \%$) – 20 468 м³/с, розрахункова витрата ГЕС – 4962 м³/с.

Після реконструкції чотирьох гідроагрегатів встановлена потужність ГЕС становить 374,2 МВт [6], а виробіток електроенергії за 2018 рік – 1387,037 млн кВт·год.

Сучасна площа дзеркала Каховського водосховища при НПП дорівнює 2131,2 км², а корисний об'єм його – 6,68 км³ [1].

Результати досліджень та їх обговорення.

Інтенсивність зовнішнього водообміну водосховища має як горизонтальні, так і вертикальні складові. До горизонтальних складових зовнішнього водообміну відносять приплив води у водосховище (по основній річці й бічний), а також стік з водосховища через гідровузол.

Одна з вертикальних складових зовнішнього водообміну враховує випадання атмосферних опадів на водну поверхню водосховища, а також випаровування з його поверхні. Ця складова іноді істотно впливає на показники зовнішнього водообміну у внутрішньорічному аспекті. Для оцінки зовнішнього водообміну пропонується також у внутрішньорічному аспекті враховувати й інші складові водного балансу водойми – скидання у водосховище стічних і побутових вод, забір води на господарські потреби.

З використанням методики, розробленої В.Н. Штефаном, А.С. Литвиновим, Г.П. Калініним і А.В. Караушевим [2–5,8,9], і рекомендацій [10] розраховано коефіцієнти інтенсивності, K_v , і показники зовнішнього водообміну, T_u , для корисного об'єму Каховського водосховища за характерні за водністю роки (табл. 1 і рис. 2–5).

У таблиці наведено порівняльні характеристики коефіцієнтів інтенсивності K_v і показники зовнішнього водообміну T_u з поступовим урахуванням всіх складових водного балансу водосховищ: K_{v1} враховує тільки

основний приплив і стік через гідровузол; K_{v2} – ще бічний приплив і перекачування; K_{v3} – ще опади і випаровування з водосховища; K_{v4} враховує суму прибуткових і витратних складових водного балансу. Показники зовнішнього водообміну T_u в часових одиницях – величина, зворотна до відповідних коефіцієнтів інтенсивності K_v , які визначаються як відношення суми припливу і витрати води з водосховища до подвоєного середнього розглянутого його об'єму за розрахунковий період.

Відзначимо, що коефіцієнт інтенсивності зовнішнього водообміну K_v зі збільшенням в розрахунках числа складових водного балансу зростає для всіх місяців характерних за водністю років експлуатації водосховища, а показник зовнішнього водообміну T_u знижується.

На рис.1–5 наведено графіки залежності показників $T_u = f(t)$.

У багатоводному 1970 році найбільша інтенсивність водообміну: зростає з січня до квітня-травня, потім слабшає до серпня, після чого знову зростає до наступного квітня-травня.

У маловодному 1972 році відбувається вирівнювання інтенсивності зовнішнього водообміну з травня до кінця року, за винятком різкого її зниження в березні.

У 2015 році ослаблення інтенсивності водообміну на високих показниках відбувається з лютого до жовтня, особливо різке – з серпня до жовтня. У 2015 році показники зовнішнього водообміну виявилися найгіршими за 63 роки експлуатації водосховища.

Для заповненого Каховського водосховища максимальні коефіцієнти інтенсивності зовнішнього водообміну в багатоводному 1970 році у травні: $K_{v1} = 0,701$, $K_{v2} = 0,998$, $K_{v3} = 1,01$, $K_{v4} = 1,02$; мінімальні в серпні: $K_{v1} = 0,120$, $K_{v2} = 0,122$, $K_{v3} = 0,134$, $K_{v4} = 0,152$. Показники зовнішнього водообміну T_u змінювалися в травні від 1,43 до 0,98 років, а в серпні – від 8,33 до 6,58 років (рис.1 і 3), в річному аспекті – 0,21 років. Вплив бічного припливу найбільший у травні (22,76 %) та у квітні

(25,03 %), а з урахуванням випаровування та опадів – 30,4 % у травні та 25,2 % – у квітні.

Для корисного об'єму водосховища максимальні коефіцієнти інтенсивності зовнішнього водообміну в багатководному 1970 році – у травні: $K_{в1} = 1,799$, $K_{в2} = 2,561$, $K_{в3} = 2,584$, $K_{в4} = 2,622$; мінімальні – у серпні: $K_{в1} = 0,329$, $K_{в2} = 0,334$, $K_{в3} = 0,367$, $K_{в4} = 0,417$. Показники зовнішнього водообміну $T_{у}$ змінювалися в травні – відповідно 0,556, 0,390, 0,387, 0,381 років; а в серпні – 3,039, 2,994, 2,725, 2,398 років (рис. 2 і 3), в річному аспекті – 0,073 років. Вплив бокового припливу, опадів і випаровування в 1970 році – аналогічно заповненому водосховищу.

У маловодному році експлуатації (1972) заповненого Каховського водосховища відповідні максимальні коефіцієнти інтенсивності зовнішнього водообміну в січні: $K_{в1} = 0,358$,

$K_{в2} = 0,359$, $K_{в3} = 0,360$, $K_{в4} = 0,364$; а мінімальні, в березні, – $K_{в1} = 0,080$, $K_{в2} = 0,081$, $K_{в3} = 0,084$, $K_{в4} = 0,091$. Показники зовнішнього водообміну $T_{у}$ змінювалися в січні від 2,79 до 2,75 років, а в березні від 12,50 до 10,99 років (рис.1 і 4), в річному аспекті – 0,59 років. Максимальний вплив бічного припливу на зовнішній водообмін становить 17,7 % (серпень), 17,5 % (липень), 17,4 % (червень), а з урахуванням опадів і випаровування в ті самі місяці – 25,6; 25,6 і 25,2 %, навіть у вересні – 17,6 %. Високий відсоток протягом шести місяців (квітень–вересень) – від 20,1 до 28,6 % – має вплив на інтенсивність зовнішнього водообміну сумарних складових водного балансу водосховища, а максимальний вплив (у квітні) тільки господарського використання водосховища становить близько 15 %.

Таблиця 1. Показники зовнішнього водообміну Каховського водосховища

Table 1. Indicators foreign exchange Kakhovka reservoir

Місяць	$K_{в1}$	$T_{у1}$, років	$K_{в2}$	$T_{у2}$, років	$K_{в2}>K_{в1}$, %	$K_{в3}$	$T_{у3}$, років	$K_{в3}>K_{в1}$, %	$K_{в4}$	$K_{в4}>K_{в1}$, %	$T_{у4}$, років
<i>Багатководний 1970 рік</i>											
I	0,846	1,182	0,851	1,175	0,59	0,863	1,159	1,97	0,876	3,42	1,141
II	0,977	1,023	0,992	1,008	1,51	1,000	1,000	2,30	1,012	3,46	0,988
III	1,342	0,745	1,359	0,736	1,25	1,365	0,733	1,68	1,380	2,75	0,725
IV	1,736	0,576	2,316	0,432	25,04	2,322	0,431	25,24	2,346	26,0	0,426
V	1,799	0,556	2,561	0,390	29,75	2,584	0,387	30,38	2,622	31,39	0,381
VI	1,011	0,989	1,083	0,923	6,65	1,110	0,901	8,92	1,152	12,24	0,868
VII	0,442	2,262	0,451	2,217	1,99	0,481	2,079	8,11	0,535	17,38	1,869
VIII	0,329	3,039	0,334	2,994	1,50	0,367	2,725	10,35	0,417	21,10	2,398
IX	0,429	2,331	0,434	2,304	1,15	0,456	2,193	5,92	0,484	11,36	2,066
X	0,586	1,706	0,591	1,692	0,85	0,614	1,629	4,56	0,630	6,98	1,587
XI	0,686	1,458	0,692	1,445	0,87	0,700	1,429	2,00	0,712	3,65	1,404
XII	0,999	1,001	1,002	0,998	0,30	1,016	0,984	1,67	1,028	2,82	0,973
<i>Маловодний 1972 рік</i>											
I	1,106	0,904	1,109	0,902	0,27	1,112	0,899	0,54	1,125	1,69	0,889
II	0,708	1,412	0,711	1,406	0,42	0,714	1,400	0,84	0,726	2,50	1,377
III	0,227	4,405	0,230	4,348	1,30	0,238	4,202	4,62	0,258	12,01	3,876
IV	0,244	4,098	0,252	3,968	3,17	0,257	3,891	5,06	0,304	19,74	3,289
V	0,329	3,039	0,382	2,618	13,87	0,399	2,506	17,54	0,416	20,91	2,404
VI	0,268	3,731	0,324	3,086	17,28	0,358	2,793	25,14	0,372	27,96	2,688
VII	0,277	3,610	0,336	2,976	17,56	0,373	2,681	25,74	0,389	28,79	2,571

Продовження таблиці 1

VIII	0,260	3,846	0,316	3,164	17,72	0,349	2,865	25,50	0,364	28,57	2,747
IX	0,270	3,704	0,295	3,390	8,47	0,328	3,049	17,68	0,344	21,51	2,907
X	0,349	2,865	0,362	2,762	3,59	0,382	2,618	8,64	0,393	11,19	2,544
XI	0,366	2,732	0,374	2,674	2,14	0,382	2,618	4,19	0,396	7,58	2,525
XII	0,423	2,364	0,429	2,331	1,40	0,432	2,315	2,08	0,446	5,16	2,242
<i>Дуже маловодний 2015 рік</i>											
I	0,387	2,584	0,390	2,564	0,77	0,393	2,544	1,53	0,414	6,52	2,415
II	0,428	2,336	0,431	2,320	0,69	0,440	2,273	2,72	0,461	7,16	2,169
III	0,275	3,636	0,277	3,610	0,72	0,291	3,436	5,50	0,314	12,42	3,185
IV	0,214	4,673	0,217	4,608	1,38	0,233	4,292	8,15	0,257	16,73	3,891
V	0,232	4,310	0,235	4,255	1,28	0,254	3,937	8,66	0,298	22,15	3,356
VI	0,196	5,102	0,196	5,102	0,00	0,224	4,464	12,50	0,269	27,14	3,717
VII	0,276	3,623	0,276	3,623	0,00	0,305	3,279	9,51	0,360	23,33	2,778
VIII	0,243	4,115	0,246	4,065	1,22	0,288	3,472	15,62	0,351	30,77	2,849
IX	0,180	5,556	0,180	5,556	0,00	0,208	4,808	13,46	0,251	28,29	3,984
X	0,167	5,988	0,189	5,291	11,64	0,211	4,739	20,85	0,220	24,09	4,545
XI	0,217	4,608	0,217	4,608	0,00	0,236	4,237	8,05	0,261	16,85	3,831
XII	0,316	3,164	0,319	3,135	0,94	0,325	3,077	2,77	0,346	8,67	2,890

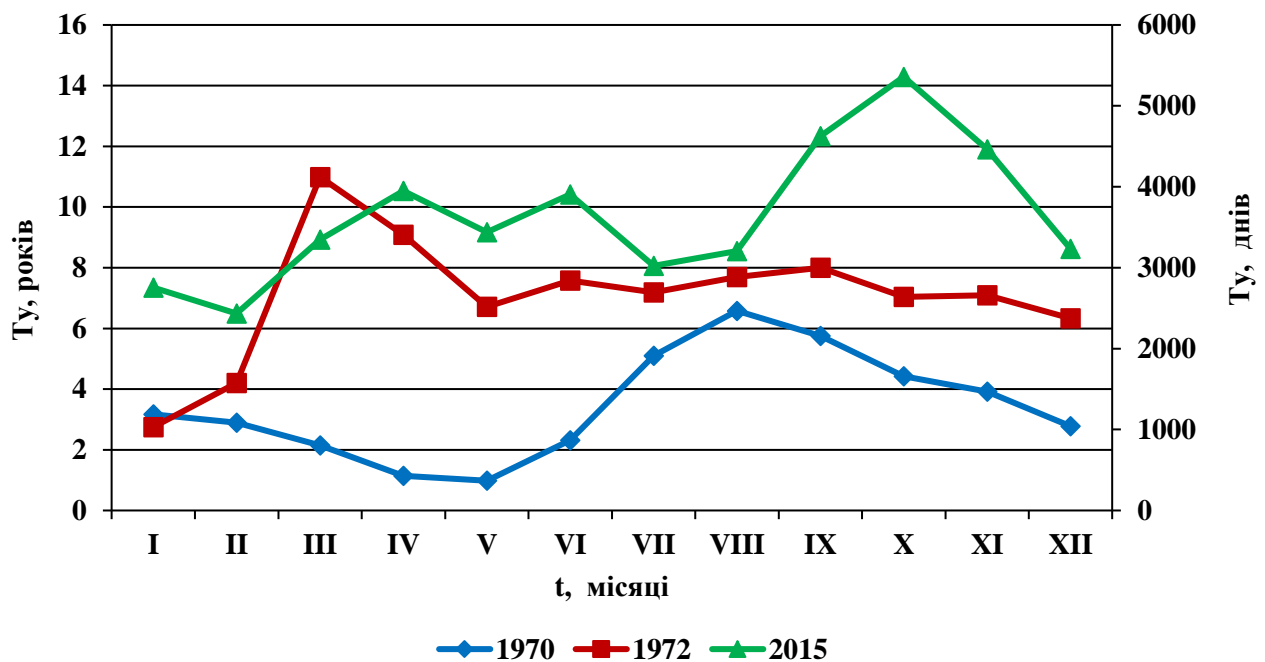


Рис. 1. Графік $T_u = f(t)$ показників зовнішнього водообміну в заповненому Каховському водосховищі в проєктних параметрах [7]

Fig. 1. Graph $T_u = f(t)$ indicators of external water exchange in the filled Kakhovka reservoir in the project settings [7]

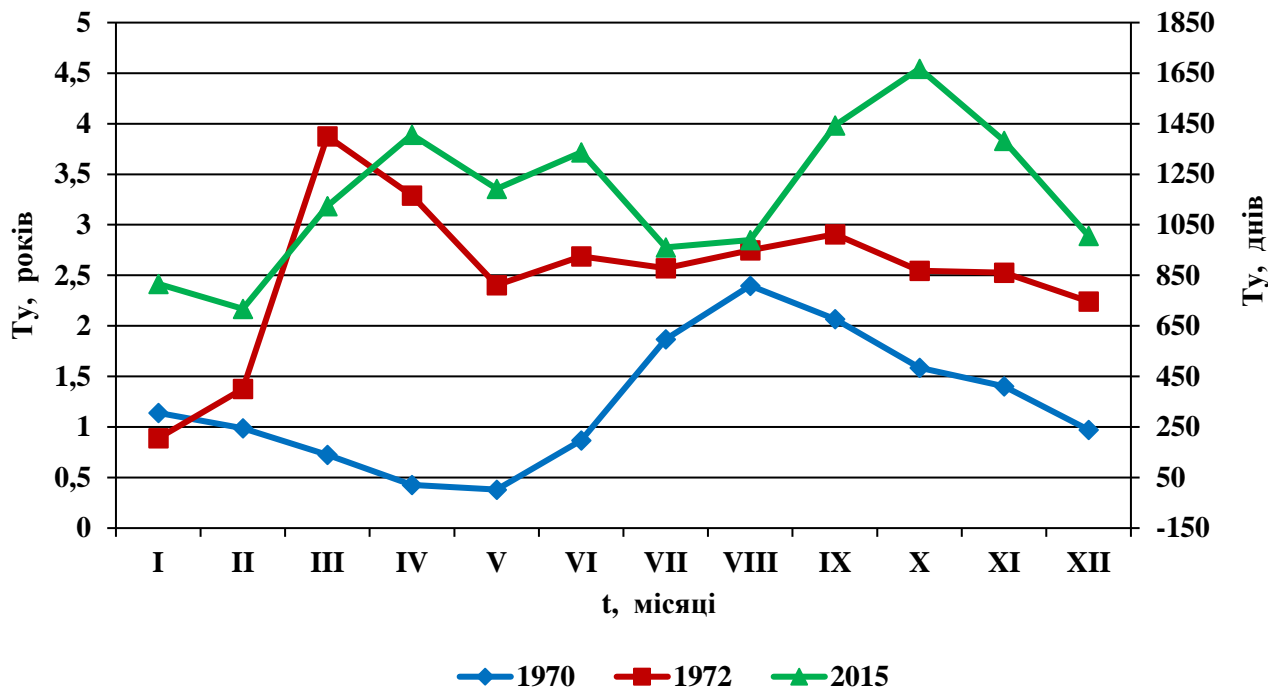


Рис. 2. Графік $T_u = f(t)$ показників зовнішнього водообміну для корисного об'єму Каховського водосховища в проєктних параметрах [6]

Fig. 2. Graph $T_u = f(t)$ indicators of external water exchange in useful volume Kakhovka reservoir in the project settings [6]

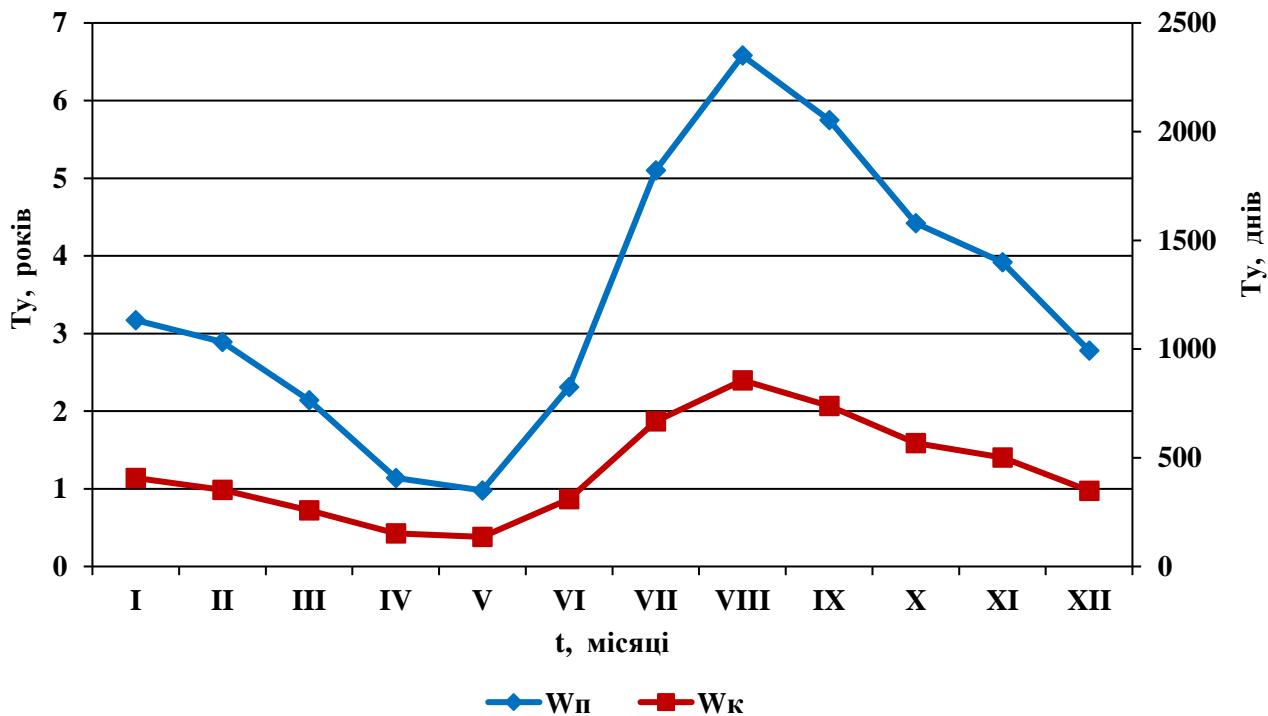


Рис. 3. Графік $T_u = f(t)$ показників зовнішнього водообміну в багатоводному 1970 році

Fig. 3. Graph $T_u = f(t)$ indicators of external water exchange in low water 1970

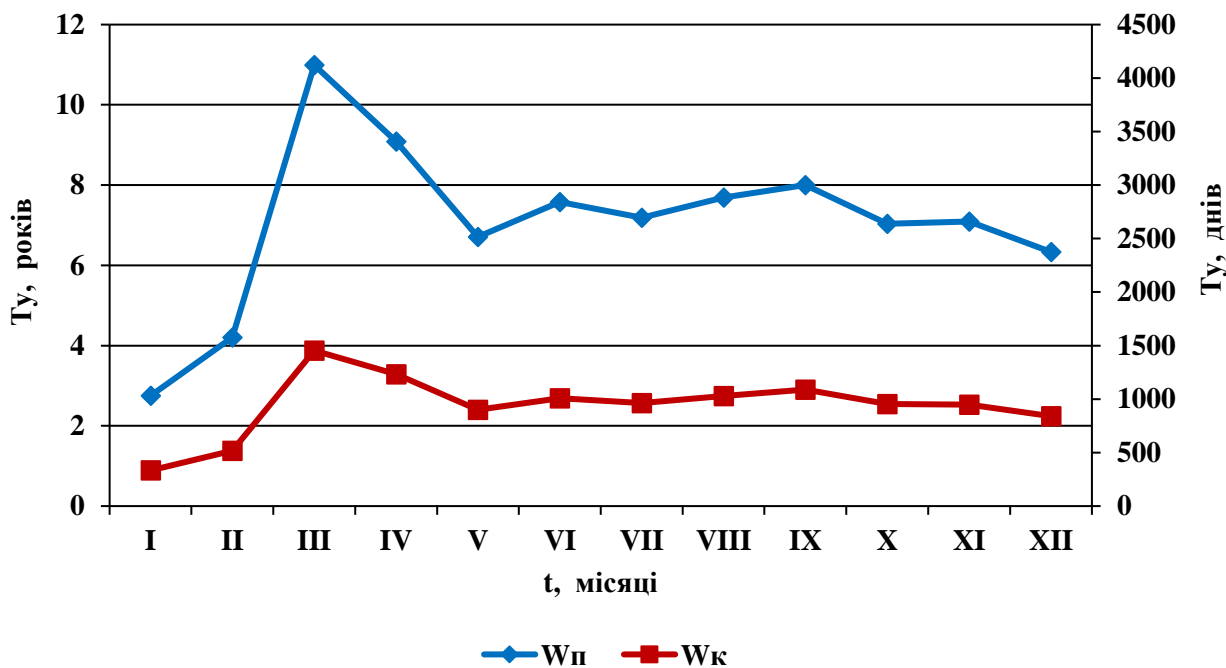


Рис. 4. Графік $T_u = f(t)$ показників зовнішнього водообміну в маловодному 1972 році

Fig. 4. Graph $T_u = f(t)$ indicators of external water exchange in low water 1972

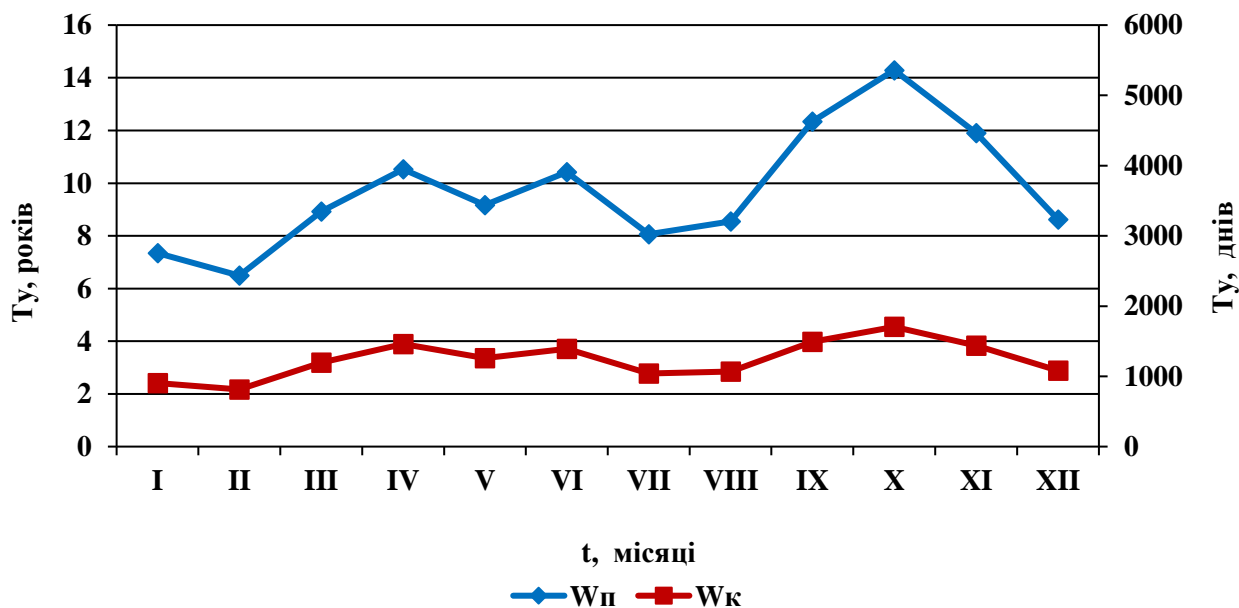


Рис. 5. Графік $T_u = f(t)$ показників зовнішнього водообміну в дуже маловодному 2015 році

Fig. 5. Chart $T_u = f(t)$ indicators of external water exchange in very low water 2015

Для корисного об'єму водосховища максимальні коефіцієнти інтенсивності зовнішнього водообміну в маловодному 1972 році в січні: $K_{B1} = 1,106$, $K_{B2} = 1,109$, $K_{B3} = 1,112$, $K_{B4} = 1,125$; мінімальні – в березні: $K_{B1} = 0,227$, $K_{B2} = 0,230$, $K_{B3} = 0,238$, $K_{B4} = 0,258$. Показники зовнішнього водообміну T_u змінювалися в січні –

відповідно, 0,904, 0,902, 0,899, 0,889 років; а в березні – 4,405, 4,348, 4,202, 3,876 років (рис. 2 і 4), в річному аспекті – 0,205 років. Вплив бокового припливу, опадів і випаровування в 1972 році – аналогічно заповненому водосховищу.

У дуже маловодному році експлуатації (2015) заповненого Каховського водосховища

максимальні коефіцієнти інтенсивності зовнішнього водообміну спостерігаються в лютому: $K_{В1} = 0,143$, $K_{В2} = 0,144$, $K_{В3} = 0,147$, $K_{В4} = 0,154$; а мінімальні – у жовтні: $K_{В1} = 0,053$, $K_{В2} = 0,060$, $K_{В3} = 0,067$, $K_{В4} = 0,070$. Показники зовнішнього водообміну T_u змінювалися в лютому від 6,99 до 6,49 років, а в жовтні – від 18,86 до 14,29 років (рис. 1 і 5), в річному аспекті – 0,77 років. Максимальний вплив бокового припливу на зовнішній водообмін становить 11,67 % у жовтні, а мінімальний (нульовий) – у червні, липні та вересні. Максимальний вплив тільки опадів і випаровування (13,43 %) спостерігається у вересні. Сумарні складові водного балансу максимально впливають на зовнішній водообмін (30,77 %) у серпні. Максимальний вплив тільки господарського використання (близько 15 %) у червні, серпні та вересні.

У дуже маловодному (2015) році експлуатації корисного об'єму Каховського водосховища максимальні коефіцієнти інтенсивності зовнішнього водообміну

спостерігаються в лютому (табл. 1: $K_{В1} = 0,428$, $K_{В2} = 0,431$, $K_{В3} = 0,440$, $K_{В4} = 0,461$; а мінімальні – у жовтні: $K_{В1} = 0,167$, $K_{В2} = 0,189$, $K_{В3} = 0,211$, $K_{В4} = 0,220$). Показники зовнішнього водообміну T_u змінювалися в лютому від 2,336 до 2,169 років, а в жовтні – від 5,988 до 4,545 років (рис. 2 і 5), в річному аспекті – 0,263 років. Максимальний вплив бокового припливу, опадів і випаровування, господарського використання на зовнішній водообмін корисного об'єму водосховища – аналогічно заповненому водосховищу.

Зіставляючи показники інтенсивності зовнішнього водообміну по Каховському водосховищу в багатоводному і маловодних роках його експлуатації (рис. 2) відмітимо значний вплив бічного припливу у весняні (квітень-травень) місяці в багатоводному році й у літні (серпень) – в дуже маловодному 2015 році. Оподи і випаровування помітно впливають на водообмін у серпні 1970 року і в жовтні 2015 року. Господарське використання водосховища найбільш ефективно для водообміну в 1970 році й у 1972-му.

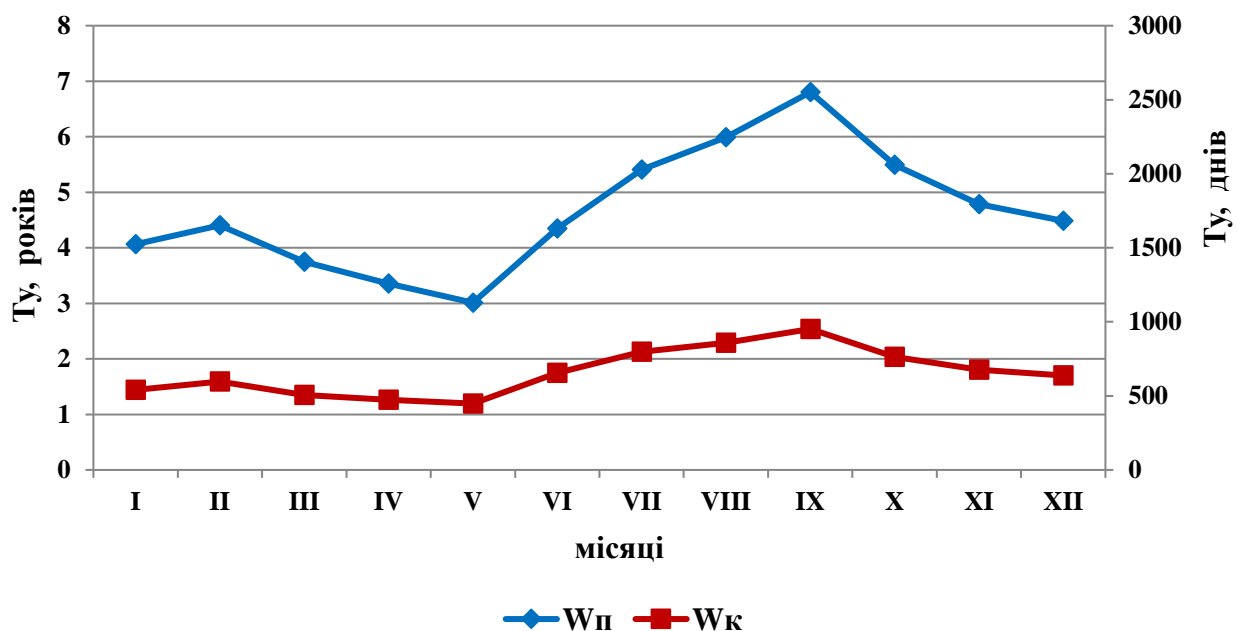


Рис. 6. Графік $T_u = f(t)$ середньобаторічних показників зовнішнього водообміну заповненого W_p , та корисного W_k об'ємів водосховища

Fig. 6. Graph $T_u = f(t)$ of the average long-term indicators of external water exchange of full W_p and useful W_k volume of the reservoir

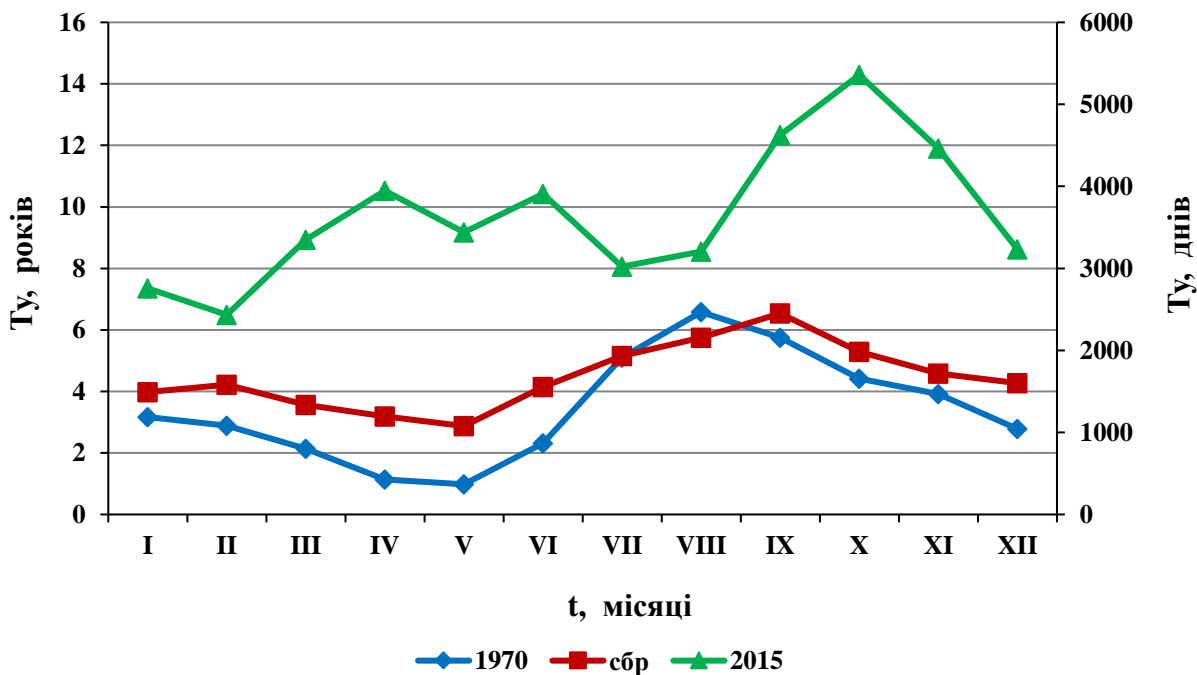


Рис. 7. Графік $T_u = f(t)$ показників зовнішнього водообміну в заповненому водосховищі
 Fig. 7. Graph $T_u = f(t)$ indicators of external water exchange in a filled reservoir

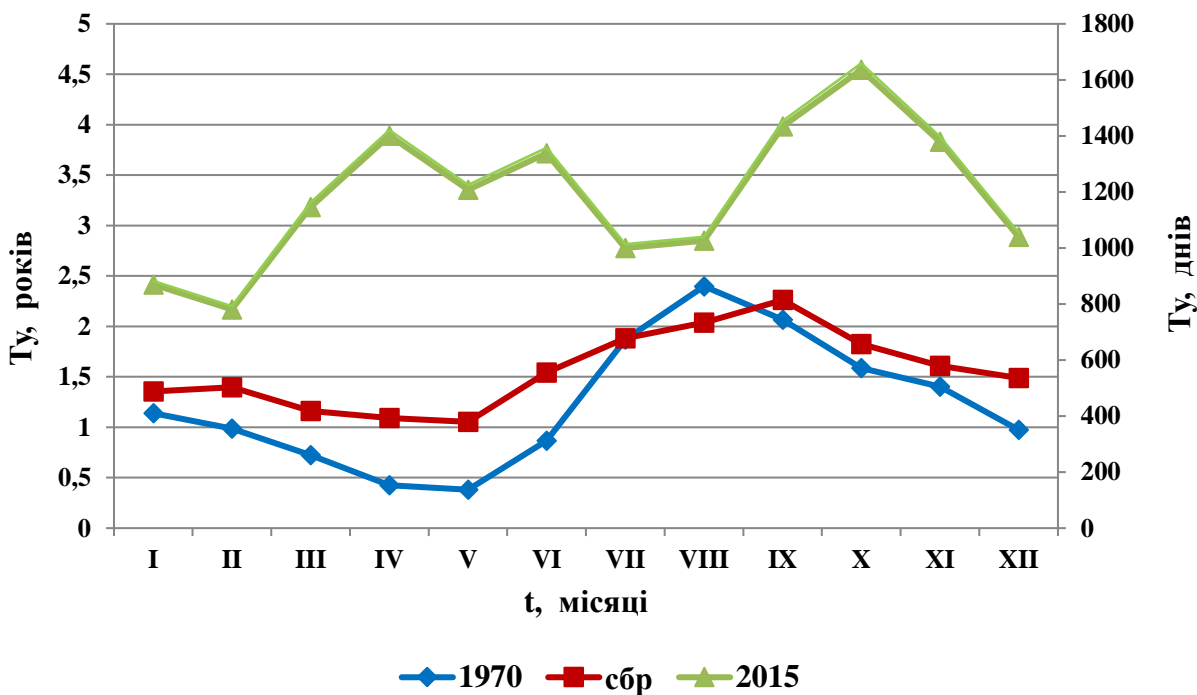


Рис. 8. Графік $T_u = f(t)$ показників зовнішнього водообміну в корисному об'ємі водосховища
 Fig. 8. Graph $T_u = f(t)$ indicators of external water exchange in the useful volume of the reservoir

Для фахівців також становлять інтерес середньобагаторічні показники інтенсивності зовнішнього водообміну в Каховському водосховищі.

На рис. 6, 7 і 8 наведено графіки зміни середньобагаторічних показників зовнішнього водообміну за період 1966–2017 рр. у заповненому і корисному об'ємах водосховища та зіставлення їх з показниками у характерні за водністю роки.

Для заповненого Каховського водосховища максимальні коефіцієнти середньобагаторічної інтенсивності зовнішнього водообміну в травні: $K_{В1} + K_{В2} = 0,301$, $K_{В3} = 0,308$, $K_{В4} = 0,332$; мінімальні, у вересні: $K_{В1} + K_{В2} = 0,118$, $K_{В3} = 0,127$, $K_{В4} = 0,147$. Показники зовнішнього водообміну в одиницях часу T_u змінювалися в травні від 3,322 до 3,012 років, а у вересні – від 8,475 до 6,803 років (рис. 6), в середньорічному аспекті – 0,373 років або 136 днів.

Для корисного об'єму водосховища максимальні коефіцієнти середньобагаторічної інтенсивності зовнішнього водообміну в травні: $K_{В1} + K_{В2} = 0,760$, $K_{В3} = 0,777$, $K_{В4} = 0,837$; мінімальні, у вересні: $K_{В1} + K_{В2} = 0,318$, $K_{В3} = 0,342$, $K_{В4} = 0,394$. Показники зовнішнього водообміну в одиницях часу T_u змінювалися в травні від 1,316 до 1,195 років, а у вересні – від 3,145 до 2,538 років (рис. 6), в середньорічному аспекті – 0,141 років або 51 день.

При зіставленні на рис. 7 і 8 середньобагаторічних показників зовнішнього водообміну в заповненому і корисному об'ємах Каховського водосховища з показниками за багатоводний 1970 рік і дуже маловодний 2015-й відзначимо значне наближення їх до більш інтенсивних показників багатоводного року.

Показники зовнішнього водообміну в одиницях часу в річному аспекті для заповненого Каховського водосховища в багатоводному 1970 році дорівнює 0,21 і 0,073 років для його корисного об'єму, а в дуже маловодному 2015 році – 0,77 років або 281 день для заповненого водосховища; 0,263 років або 96 днів – для його проектного корисного об'єму W_k . Для порівняння, показники зовнішнього

водообміну заповнених водосховищ для багатоводного 1970 року на Київському водосховищі дорівнює 0,062 років, Кременчуцькому – 0,13, Дніпродзержинському – 0,031, Дніпровському – 0,039, а для дуже маловодного 2015 року на Київському водосховищі – 0,203 років, Канівському – 0,117, Кременчуцькому – 0,502, Середньодніпровському – 0,113, Дніпровському – 0,144 років.

Висновки: 1. Дослідження в умовах корисного об'єму визначають динаміку і можливості експлуатації робочої частини водойми [3, 10].

2. З шести водосховищ Дніпровського каскаду Каховське має найнижчу інтенсивність зовнішнього водообміну в межах багатоводного та маловодних років у заповненому об'ємі водосховища.

3. При зіставленні максимальних показників зовнішнього водообміну в заповненому і в корисному об'ємі водосховища в травні багатоводного року поліпшення водообміну в корисному об'ємі склало 61 %, в лютому дуже маловодного року (в проектних параметрах водосховища) – 66,6 %, а при зіставленні мінімальних показників за відповідними роками поліпшення водообміну в серпні склало 63,6 %, а в жовтні – 68,2 %.

4. Вплив бокового припливу, опадів і випаровування, сумарних складових водного балансу на інтенсивність зовнішнього водообміну в заповненому і корисному об'ємах в розглянуті роки – аналогічно заповненому водосховищу [6, 7].

5. Середньобагаторічні показники зовнішнього водообміну у водосховищі орієнтують на найбільш часто спостережувану в ньому інтенсивність водообміну.

6. Проведені дослідження повинні допомогти розробці режимів експлуатації водосховища з урахуванням економіко-екологічного чинника в умовах зміни клімату.

1. Вишневський В., Шевчук С., Шевченко І. Сучасні розміри дніпровських водосховищ. Водне господарство України. 2017. № 4. С. 23–29.
2. Вуглинский В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л. Гидрометеоздат. 1991. 223 с.
3. Калинин Г.П. Роль водохранилищ в изменении скорости водообмена речных вод. В кн.: Инженерно-географические проблемы проектирования и эксплуатации крупных равнинных водохранилищ. М. 1972. С. 99–104.
4. Караушев А.В. Внешний водообмен и формирование качества воды в озерах и водохранилищах. Труды ГГИ. 1978. Вып. 249. С. 48–63.
5. Китаев А.Б. Особенности оценки внешнего водообмена в водохранилищах. Труды междунар. конф. «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов». Т. 1. Пермь. 2013. С. 203–209.
6. Обухов Е.В. Внешний водообмен в рабочем объеме днепровских водохранилищ. Монография. Одесса. ФОП Побута М.І. 2020. 110 с.
7. Обухов Е.В. Внешний водообмен Днепровского каскада водохранилищ. Монография. Одесса. Полиграф. 2017. 100 с.
8. Штефан В.Н. К расчету водообмена долинного водохранилища. Вестник Моск. ун-та. Сер. Геогр. 1975. № 5. С. 71–75.
9. Штефан В.Н., Эдельштейн К.К. Показатели водообмена водохранилищ. В кн.: Материалы 5 Всесоюзного науч. симпозиума по соврем. пробл. Самоочищения и регулирования качества воды. Секция 1У, Ч. 2. Таллинн. 1975. С. 262–267.
10. Яцык А.В., Шмаков В.М. Гидроэкология. К. Урожай. 1992. 192 с.
- reservoirs]. *Vodne gospodarstvo Ukrainy*. 2017. No. 4. Pp. 23–29. [in Ukraine].
2. *Vuglinskii V.S. Vodnye resursy i vodniy balans krupnykh vodokhranilishch SSSR*. [Water resources and water balance of large reservoirs of the USSR]. L. *Gidrometeoizdat*. 1994. 223 p. [in Russian].
3. *Kalinin, G.P. Rol vodokhranilishch v izmenenii skorosti vodoobmena rechnykh vod*. [The role of reservoirs in changing speed of water exchange river water]. M. 1972. Pp. 99–104. [in Russian].
4. *Karushev A.V. Vneshnii vodoobmen i formirovanie kachestva vody v ozerakh i vodokhranilishchakh*. [External water exchange and formation of water quality in lakes and reservoirs]. *Trudy GGI*. Issue 249. Pp. 48–63. [in Russian].
5. *Kitaev A.B. Osobennosti otsenki vneshnego vodoobmena v vodokhranilishchakh*. [Features of the assessment of external water exchange in reservoirs]. *Proceedings int. n.-pr. conf. "Modern problems of reservoirs and their catchments"*. Vol. 1. Pp. 203–209. [in Russian].
6. *Obukhov E.V. Vneshniy vodoobmen v rabochem obeme dneprovskikh vodokhranilishch*. [External water exchange in the working volume of the Dnieper reservoirs]. *Odessa. FOP Pobuta M.I.* 2020. 110 p. [in Russian].
7. *Obukhov E.V. Vneshniy vodoobmen Dneprovskogo kaskada vodokhranilishch*. [External water exchange of the Dnieper cascade reservoirs]. *Odessa. Poligraf*. 2017. 100 p. [in Russian].
8. *Stefan V.N. K raschetu vodoobmena dolinnogo vodokhranilishcha*. [To calculate water exchange valley reservoir]. *Bulletin of Moscow. un-ta. Ser. Geogr.* 1975. No. 5. Pp. 71–75. [in Russian].
9. *Shtefan V.N., Edelshtein K.K. Pokazateli vodoobmena vodokhranilishch*. [Indicators of water exchange reservoirs]. In the book. *Materials of the 5th All-Union Scientific. symposium on modern probl. Self-purification and regulation of water quality. Section 1U, Part 2. Tallinn*. 1975. Pp. 262–267. [in Russian].
10. *Yatsyk A.V., Shmakov V.M. Hidroecologiya*. [Hydroecology]. *Kyiv. Urozhai*. 1992. 192 p. [in Russian].

REFERENCES

1. *Vishnevsky V., Shevchuk C., Shevchenko I. Suchasni rozmiry Dniprovskikh vodoskhovishch*. [Modern sizes of Dnieper

Стаття надійшла до редакції 24.04.20
Остаточна версія 11.03.21