

Безопасность комплекса гидротехнических сооружений Чернореченского водохранилища в г. Севастополе

УДК 556.166

Волосухин Я.В.

Генеральный директор ИКЦ «Безопасность гидротехнических сооружений» (г. Новочеркасск), e-mail: safety@ibgts.ru

Статья получена: 01.10.2019. Рассмотрена: 11.11.2019. Одобрена: 15.11.2019. Опубликована онлайн: 26.11.2019. ©РИОР

Аннотация. Рассмотрены вопросы безопасности комплекса гидротехнических сооружений Чернореченского водохранилища — основного источника водоснабжения города Севастополя. Исследован вопрос пропуска паводка $P = 0,1\%$ обеспеченности с учетом трансформации части паводкового объема водохранилищем. Дана оценка пропуска максимального паводка с $Q_{0,01\%}$ (с учетом гарантийной поправки) всеми водопропускными сооружениями гидроузла при наполненном водохранилище до отметки НПУ как наиболее ответственного мероприятия.

Ключевые слова: безопасность, комплекс гидротехнических сооружений, водохранилище, паводок, пропускная способность.

Введение. Крымский полуостров относится к территориям с низкой водообеспеченностью для среднего года $P = 50 \%$, водообеспеченность составляет 0,4 тыс. м³/год на одного человека, в целом по РФ — 29,1 тыс. м³/год на одного человека. На территории Крымского полуострова расположено 15 водохранилищ естественного стока с суммарным объемом при НПУ $W = 253,12$ млн м³ [1]. Суммарное водопотребление Крыма на 1990 г. составляло 3909,09 млн м³, в том числе 3202 млн м³ (81,91%) — вода Северо-Крымского канала; 296,73 млн м³ (7,59%) — речные воды (местный сток, аккумулированный

в водохранилищах и прудах); 257,85 млн м³ (6,60%) — подземные воды; 152,51 млн м³ (3,90%) — морские воды [3; 6].

С 2014 г. Украиной подача воды по Северо-Крымскому каналу прекращена и водопотребление изменено. В Крыму ныне эксплуатируются восемь водохранилищ Северо-Крымского канала с суммарным объемом при НПУ $W = 185$ млн м³, на сегодняшний день они наполнены менее чем на 50%.

На территории Крымского полуострова имеется 1657 рек, ручьев и балок общей длиной около 6 тыс. км. Гидрологическая сеть Крыма включает 34 гидропоста (один гидропост в Крыму приходится на 794 км² площади водосбора). Для сопоставления. Площадь водосбора, в км², входящейся на один гидропост, составляет: во Франции — 203 км², в Великобритании — 175 км², в Германии — 119 км², в Японии — 67 км².

Малая река Черная имеет длину 35 км и площадь водосбора 427 км². Первая рукописная работа о р. Черная была подготовлена 80 лет назад (1939 г.) сотрудником Крымского гидрометеобюро П.М. Шликать [6].

Гидропост в низовье малой р. Черная у с. Хмельницкое был установлен в 1946 г. (площадь водосбора $F = 342$ км², средняя высота водосбора $H_{cp} = 520$ м). На период проектирования и строительства Чернореченского водохранилища на

SAFETY OF COMPLEX OF HYDRAULIC STRUCTURES OF CHERNORECHENSKIY RESERVOIR IN SEVASTOPOL
Yakov Volosukhin

General Director, Engineering and Consulting Centre (ECC) «Hydraulic structures Safety», Novocherkassk; e-mail: safety@ibgts.ru

Manuscript received: 01.10.2019. Revised: 11.11.2019. Accepted: 15.11.2019. Published online: 26.11.2019. ©RIOR

Abstract. The issues of safety of the complex of hydraulic structures of the Chernorechenskiy reservoir - the main source

of water supply of the city of Sevastopol are considered. The issue of flood passage $P = 0,1\%$ of the provision taking into account the transformation of the flood volume by the reservoir has been investigated. The maximum flood pass with $Q_{0,01\%}$ (taking into account the warranty amendment) of all water passage structures of the hydro-node at the filled reservoir up to the NPP elevation as the most responsible measure has been estimated.

Keywords: reservoir, flood, capacity, safety, complex of hydraulic structures of reservoir.

р. Черная гидрологическая информация была достаточно скудной. Грунтовая плотина была построена в 1956 г., имела высоту $H = 28$ м, длину $L = 1082$ м и создавала водохранилище объемом $W = 33,2$ млн м^3 . В период с 1979 по 1984 г. была проведена реконструкция грунтовой плотины Чернореченского водохранилища, в результате которой увеличена высота плотины на 8 м ($H = 36$ м), доведя полный объем при НПУ до $W = 64,2$ млн м^3 , а полезный — до 61,2 млн м^3 .

Чернореченское водохранилище является основным источником водоснабжения в городе Федерального значения Российской Федерации Севастополе и самым крупным водохранилищем естественного стока (площадь зеркала составляет 604 га, объем воды при НПУ — 64,2 млн м^3) Крымского полуострова, предназначено для водообеспечения населения города (443 212 человек на 01.01.2019). Комплекс ГТС Чернореченского водохранилища относится к ГТС I класса — чрезвычайно высоко опасности и находится под постоянным государственным надзором Ростехнадзора.

Комплекс ГТС Чернореченского водохранилища эксплуатируется 63 года и на нем начали проявляться проблемы старения сооружений.

Цель исследования — обосновать безопасность комплекса гидротехнических сооружений (ГТС) Чернореченского гидроузла при пропуске паводка $P = 0,1\%$ обеспеченности (основной расчетный случай) с учетом трансформации части объема водохранилищем и пропуске паводка $P = 0,01\%$ (поверочный расчетный случай с учетом гарантированной поправки) всеми водопропускными сооружениями гидроузла [2–12; 14; 15].

Основные характеристики дождевого паводка за весь жизненный цикл Чернореченского гидроузла, используемые при расчетах трансформации максимального расхода воды водохранилищем: максимальный расход $Q_{0,01\%} = 660$ $\text{м}^3/\text{с}$; объем паводка $W_{0,01\%} = 89,4$ млн м^3 ; продолжительность паводка $T = 5,5$ сут; продолжительность подъема $t_1 = 1,25$ сут; продолжительность спада $t_2 = 4,25$ сут.

В данных расчетах водохранилище характеризуется «батиграфическими кривыми» (рис. 1), из которых устанавливается емкость форсиров-

ки (трансформации) расходов воды и глубина слоя форсировки: $V_{\text{ф}} = W_{\text{ФПУ}} - W_{\text{НПУ}} = 81,0 - 64,2 = 16,8$ млн м^3 ; $h_{\text{ф}} = 263,30 - 261,00 = 2,30$ м.

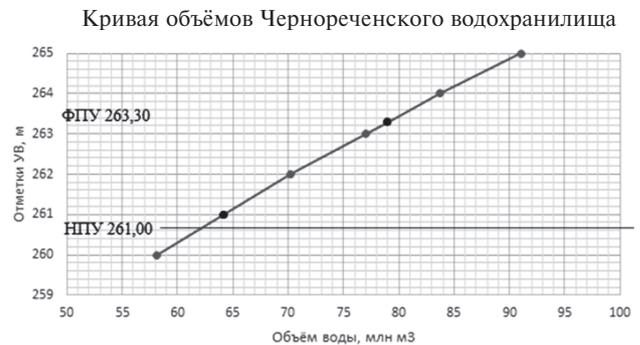


Рис. 1. Фрагменты батиграфических кривых водохранилища на р. Черная

В состав водосбросных и водопропускных сооружений Чернореченского ГУ входят: автоматический водосброс; донный водовыпуск из четырех ниток трубопровода; водозаборное сооружение из двух ниток трубопровода.

Водохозяйственный расчет водохранилища на пропуск максимальных расходов выполняется на основе уравнения баланса воды в водохранилище. В общем виде баланс воды в водохранилище за время dt может быть выражен следующим дифференциальным уравнением: $Qdt = Q_{\text{сб}}dt \pm \Omega dZ$, где Q — расчетный расход во входном створе водохранилища, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{сб}}$ — расход в створе водосбросного сооружения (сбросной расход); Ω — площадь водной поверхности водохранилища; уровень воды в водохранилище, м.

При детальном балансовом расчете применяются различные приемы приближенного интегрирования. При этом весь период половодья делят на конечные малые интервалы времени, в течение которых расходы притока и сброса можно считать изменяющимися линейно.

Гидрограф модели паводка приведен на рис. 2.

Уравнение с конечными интервалами времени примет вид:

$$\frac{Q_{\text{н}} + Q_{\text{к}}}{2} \Delta t - \frac{Q_{\text{сб.н}} + Q_{\text{сб.к}}}{2} \Delta t = \Delta W,$$

где ΔW — изменение объема водохранилища; индексы н и к означают начало и конец расчетного интервала времени.

В уравнении неизвестны сбросной расход $Q_{сб.к}$ и объем водохранилища W_k на конец интервала.

Расчет выполнен численными табличными способами. В начале первого расчетного интервала расходы притока и сброса равны нулю. В конце интервала приток определяют, как ординату гидрографа половодья (паводка) и вычисляют объем стока за интервал. Сбросной расход на конец интервала неизвестен; задаются отметкой уровня воды в водохранилище на конец интервала Z'_k и по графику пропускной способности водосброса находят в первом приближении сбросной расход. Решая уравнение баланса воды в водохранилище, находим его объем на конец интервала, и по батиграфической кривой $Z = f(W)$ устанавливаем соответствующую отметку уровня воды $Z_{уб}$. Если $Z_{уб}$ и Z'_k не совпадают, то изменяется отметка Z'_k , и расчет повторяется. Конечный расход стока Q_k , сбросного расхода $Q_{сб.к}$ и емкости W_k одного интервала являются начальными для последующего.

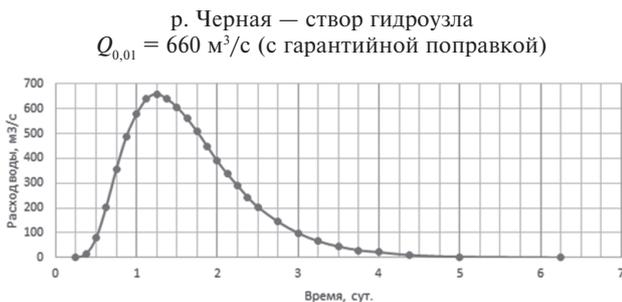


Рис. 2. Расчетный гидрограф паводка 0,01% обеспеченности

В результате расчета находят ординаты гидрографа сбросных расходов (расходы и уровни). Сбросные расходы вычисляют в зависимости от уровня воды в водохранилище.

При заданных условиях в указанных границах возможно переполнение водохранилища; уровень может подняться до отметки 264,30 м, т.е. на 1,0 м выше отметки ФПУ. По оценке баланса притока и сброса, необходима предупаводковая сработка водохранилища $\sim 20,0$ млн м^3 , до отметки 256,40 м БС. В этом варианте предусмотрено включение водовыпуска на пропуск расходов с началом паводка; величина этих расходов будет зависеть от устанавливаемого уровня воды в водохранилище.

Результат расчета показывает, что даже при столь глубокой сработке уровня (до отметки 256,40 м БС) возможно переполнение водохранилища от отметки ФПУ на 0,1 м (до отметки 263,4 м БС). Период стояния максимальных уровней составляет 0,5 суток. При таком режиме возможно еще избежать катастрофических последствий.

Основные характеристики дождевого паводка, используемые при расчете трансформации максимального расхода воды водохранилищем: максимальный расход $Q_{0,1\%} = 370 \text{ м}^3/\text{с}$; объем паводка $W_{0,01\%} = 50,1$ млн м^3 ; коэффициент несимметричности гидрографа $k_s = 0,33$; продолжительность паводка $T = 5,5$ сут; продолжительность подъема $t_1 = 1,25$ сут; продолжительность спада $t_2 = 4,25$ сут.

Гидрограф модели паводка 0,1% приведен на рис. 3.

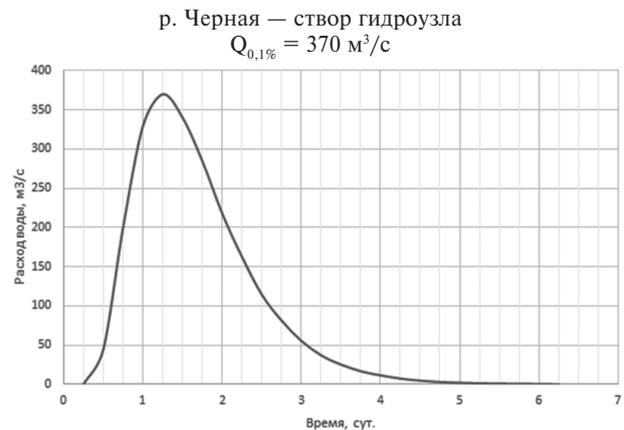


Рис. 3. Расчетный гидрограф паводка 0,1% обеспеченности

Расчет трансформации паводка представлен в табл. 1. Расчетные графики показаны на рис. 4 и 5.

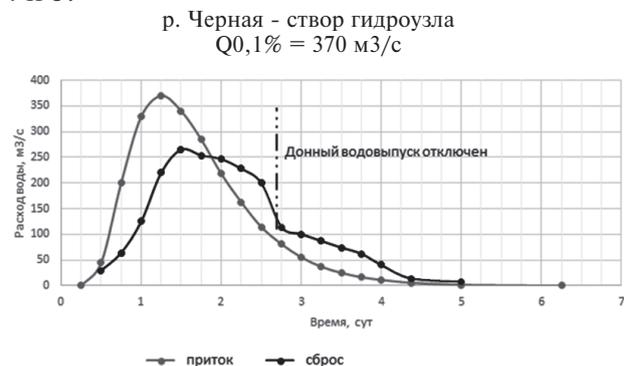


Рис. 4. Гидрографы притока и сброса паводка в створе Чернореченского гидроузла существующими водосбросными сооружениями

Расчет пропуска паводка 0,1% ВП в створе Чернореченского гидроузла существующими сооружениями

$Z_{НПУ} = 261,00 \text{ м}; Z_{ФПУ} = 263,30 \text{ м}; h_{\phi} = 2,30 \text{ м}; W_{НПУ} = 64,2 \text{ млн м}^3; W_{ФПУ} = 81,0 \text{ млн м}^3;$

$V_{\phi} = 16,8 \text{ млн м}^3; Q_{0,1\%} = 370 \text{ м}^3/\text{с}; \Delta t = 0,25 \text{ сут. } (21,6 \cdot 10^3 \text{ с})$

№ интервала	$\Delta t, \text{ сут}$	$\Sigma \Delta t$ нарастающим итогом	Приток			Сброс				$W_{\text{акк}}^{\text{ср.аб.}}$ за интервал (по формуле), млн м ³	Водохранилище		
			$Q_{\text{н}}^{\text{п}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{к}}^{\text{п}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$\frac{Q_{\text{н}} + Q_{\text{к}}}{2} \Delta t, \text{ млн м}^3$	$Q_{\text{сб.н}}^{\text{ср.п}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Z'_{\text{к}}, \text{ м БС}$	$Q_{\text{сб.к}}^{\text{ср.п}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$\frac{Q_{\text{сб.н}} + Q_{\text{сб.к}}}{2} \Delta t, \text{ млн м}^3$		$W_{\text{н}}, \text{ млн м}^3$	$W_{\text{к}}, \text{ млн м}^3$	$Z_{\text{УВ}}, \text{ м БС}$
1	0,25	0,25	0	0	0						64,20	64,20	261,00
2		0,50	0	44,4	0,48	0	261,10	30,0	0,19	0,29	64,2	64,49	261,10
3		0,75	44,4	199,8	2,64	30,0	261,15	64,0	1,02	1,62	64,49	66,11	261,15
4		1,00	199,8	329,3	5,71	64,0	261,8	125,0	2,04	3,67	66,11	69,78	261,80
5		1,25	329,3	370,0	7,55	125,0	262,45	220,0	3,73	3,82	69,78	73,60	262,45
6		1,50	370,0	340,4	7,67	220,0	262,90	265,0	5,24	2,43	73,60	76,03	262,95
7		1,75	340,4	284,9	6,75	265,0	263,00	246,5	5,52	1,23	76,03	77,26	263,00
8		2,00	284,9	218,3	5,43	246,5	263,00	246,5	5,32	0,11	77,26	77,37	263,05
9		2,25	218,3	162,8	4,12	246,5	262,90	228,0	5,12	-1,00	77,37	76,37	262,90
10		2,50	162,8	114,7	3,00	228,0	262,80	210,0	4,73	-1,73	76,37	74,64	262,70
11		2,75	114,7	81,4	2,12	210,0	262,20	114,6	3,51	-1,39	74,64	73,25	262,40
12		3,00	81,4	55,5	1,48	114,6	262,10	100,6	2,32	-0,84	73,25	72,41	262,20
13		3,25	55,5	37,0	1,00	100,6	262,00	87,2	2,03	-1,03	72,41	71,38	262,10
14		3,50	37,0	25,2	0,67	87,2	261,90	74,4	1,75	-1,08	71,38	70,30	261,90
15		3,75	25,2	16,7	0,45	74,4	261,80	62,4	1,48	-1,03	70,30	69,27	261,80
16		4,00	16,7	11,5	0,30	62,4	261,60	40,5	1,11	-0,81	69,27	68,46	261,70
17	1,0	5,00	11,5	1,9	0,58	40,5	261,30	14,0	2,35	-1,77	68,46	66,69	261,30
18		6,00	1,9	0	0,10	14,0		7,8	0,94	-0,84	66,69	65,85	261,10
19		7,00											261,00

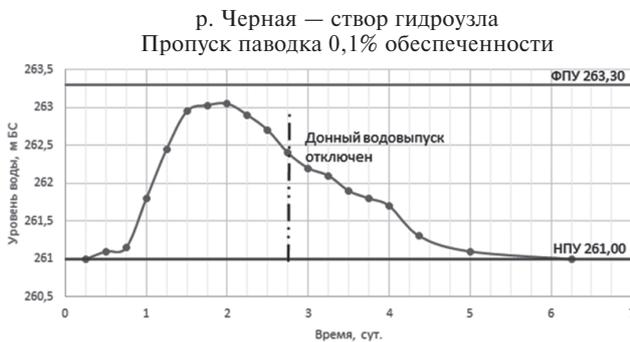


Рис. 5. Динамика уровня воды в водохранилище при пропуске паводка существующими сооружениями

Выводы

1. Обоснованы расходы редкой обеспеченности ($P = 0,1\%$ и $P = 0,01\%$) р. Черная в створе Чернореченского водохранилища с учетом всего периода наблюдений на гидропосте в с.

Хмельницкое (бывшее Чернореченское, $T = 63$ года) и данных службы эксплуатации гидроузла за весь его жизненный цикл.

2. Комплекс гидротехнических сооружений (ГТС) Чернореченского водохранилища и его противопаводковая емкость позволяет трансформировать паводок $P = 0,1\%$ обеспеченностью без превышения отметки НПУ.

3. На спаде основной волны паводка $P = 0,1\%$ возможно отключение донного водовыпуска, так как водосбросное сооружения самостоятельно справится с пропуском оставшейся части гидрографа притока в Чернореченское водохранилище.

4. В целях контроля за состоянием водохранилища и его водосбора и своевременного принятия мер по пропуску паводков редкой обеспеченности рекомендуется создание *автома-*

тизированной системы мониторинга и прогнозирования состояния водных объектов, влияющих на безопасность гидротехнических сооружений гидроузла Чернореченского водохранилища. В состав такой системы входят три автоматизированных гидрологических поста (АГК) — уровнемеры и осадкомеры, а также подсистема гидрологического моделирования на основе математических моделей, позволяющая в ре-

жиме реального времени давать прогноз притока с пошаговой коррекцией и оценивать ситуацию для принятия управляющих решений.

Автор выражает благодарность профессорам, д-рам техн. наук М.М. Мордвинцеву, В.Л. Бондаренко и В.А. Волосухину за ценные замечания и пожелания по статье, улучшившие ее содержание.

Литература

1. Волосухин Я.В. Обеспечение безопасности водопользования в Республике Крым [Текст] / Я.В. Волосухин, Д.Ю. Наволокин // Водоснабжение и санитарная техника. — 2017. — № 6. — С. 4–9.
2. Асарин А.Н. Расчетные паводки и безопасность плотин (по материалам СИГБ) [Текст] / А.Е. Асарин, В.М. Семенов // Гидротехническое строительство. — 1992. — № 8. — С. 55
3. О состоянии сооружений и возможности их эксплуатации объекта «Чернореченское водохранилище»: технический отчет [Текст] / Я.В. Волосухин; ИКЦ «Безопасность ГТС». — Новочеркасск, 2016. — 121 с.
4. Калустян Э.С. Оценка и роль рисков в плотиностроении (с использованием материалов СИГБ) [Текст] / Э.С. Калустян // Гидротехническое строительство. — 1999. — № 12. — С. 27–31.
5. Безопасность России. Энциклопедический словарь-справочник / науч. рук. Н.А. Махутов. — М.: Знание, 2008. — 528 с.
6. Тимченко З.В. Гидрография и гидрология рек Крыма [Текст]: монография / З.В. Тимченко. — Симферополь: АРИАЛ, 2012. — 290 с.
7. Паводок, половодье, наводнение — есть ли разница? — URL: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/pavodok-polovode-navodnenie-est-li-raznitsa>
8. Паводки на реках Севастополя. — URL: <http://xn--b1amnebsh.xn--80adi0aoagldk8i.xn--p1ai/glavnoe/item/15950-2018-10-08-10-59-28.html>
9. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши [Текст]. — Т. 2. — Вып. 3. Бассейны Северского Донца, рек Крыма и Приазовья. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 362 с.
10. Чернореченское водохранилище. Правила эксплуатации [Текст] / Укргипроводхоз. — Киев, 1980. — Т. 1. — 271 с.
11. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик: введен взамен СНиП 2.01.14-83: дата введения 01.01.2004. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035578>
12. СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения: введен взамен СНиП 33-01-2003: дата введения 2013-01-01. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200094156>
13. Энциклопедия безопасности гидротехнических сооружений (около 800 терминов) [Текст] / под общ. ред. В.А. Волосухина. — 5-е изд., испр. и доп. — Новочеркасск: Изд-во ЮРГПУ (НПИ), 2017. — 138 с.
14. Schnitter N.J. A history of dams: the useful Pyramids. — Aa Balkema, 1994. — 282 p.
15. Proceedings of the Twenty-Sixth International Congress on Large Dams (4th–6th July 2018, Vienna — Austria). URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9780429465086>

References

1. Volosukhin Ya.V. Obespechenie bezopasnosti vodopol'zovaniya v Respublike Krym [Ensuring the safety of water use in the Republic of Crimea]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary equipment]. 2017, I. 6, pp. 4–9.
2. Asarin A.N. Raschetnye pavodki i bezopasnost' plotin (po materialam SIGB) [Design floods and dam safety (based on SIGB materials)]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]. 1992, I. 8, p. 55.
3. O sostoyanii sooruzhenij i vozmozhnosti ih ekspluatcii ob'ekta «Chernorechenskoe vodohranilishche»: tekhnicheskij otchet [On the state of structures and the possibility of their operation of the facility “Chernorechenskoe reservoir”: technical report]. IKC «Bezopasnost' GTS» [ICC “Safety of GTS”]. Novoчеркасск, 2016. 121 p.
4. Kalustyan E.S. Ocenka i rol' riskov v plotinostroenii (s ispol'zovaniem materialov SIGB) [Assessment and the role of risks in dam construction (using SIGB materials)]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]. 1999, I. 12, pp. 27–31.
5. Bezopasnost' Rossii. Enciklopedicheskij slovar'-spravochnik [Security of Russia. Encyclopedic Dictionary-Reference]. Moscow: Znanie Publ., 2008. 528 p.
6. Timchenko Z.V. Gidrografiya i gidrologiya rek Kryma [Hydrography and hydrology of the rivers of Crimea]. Smferopol': IT «ARIAL» Publ., 2012. 290 p.
7. Pavodok, polovod'e, navodnenie — est' li raznica? [Flood, flood, flood - is there any difference?]. Available at: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/pavodok-polovode-navodnenie-est-li-raznitsa>
8. Pavodki na rekah Sevastopol'ya [Floods on the rivers of Sevastopol]. Available at: <http://xn--b1amnebsh.xn--80adi0aoagldk8i.xn--p1ai/glavnoe/item/15950-2018-10-08-10-59-28.html>
9. Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Mnogoletnie dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushi [The State Water Cadastre. Long-term data on the regime and resources of land surface water]. Bassejny Severskogo Donca, rek Kryma i Priazov'ya [The basins of the Seversky Donets, the rivers

- of Crimea and the Sea of Azov]. L.: Gidrometeoizdat, 1985, V. 2, I. 3, 362 p.
10. Chernorechenskoe vodohranilishche. Pravila ekspluatacii [Chernorechenskoe reservoir. Rules of operation]. Ukrgiprovdhoz [Ukrgiprovdhoz]. Kiev, 1980, V. 1, 271 p.
 11. SP 33-101-2003. Opredelenie osnovnyh raschyotnyh gidrologicheskikh harakteristik: vveden vzamen SNIp 2.01.14-83: data vvedeniya 01.01.2004 [SP 33-101-2003. Determination of the main calculated hydrological characteristics: introduced instead of SNIp 2.01.14-83: date of introduction 01.01.2004]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200035578>
 12. SP 58.13330.2012 Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Osnovnye polozheniya: veden vzamen SNIp 33-01-2003: data vvedeniya 2013-01-01 [SP 58.13330.2012 Waterworks. Key points: replaced instead of SNIp 33-01-2003: date of introduction 2013-01-01]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200094156>
 13. Enciklopediya bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenij (okolo 800 terminov) [Encyclopedia of safety of hydraulic structures (about 800 terms)]. Novochoerkassk: YuRGPU(N-PI) Publ., 2017. 138 p.
 14. Schnitter N.J. A history of dams: the useful Pyramids. Aa Balkema, 1994. 282 p.
 15. Proceedings of the Twenty-Sixth International Congress on Large Dams (4th–6th July 2018, Vienna – Austria). Available at: <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9780429465086>