

Ю.Н. Соколов, д.т.н., проф., **Т.Ю. Стрюк**, асп.
Одесский государственный экологический университет
С.В. Сурков, к.т.н., доц.
Одесский национальный политехнический университет

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ДУНАЙСКИХ ОЗЕР В СВЯЗИ С ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ ПОДВОДЯЩИХ КАНАЛОВ

В данной работе рассмотрены причины экологических проблем придунайских озер, возникшие после сооружения каналов, соединяющих их с рекой Дунай.

Ключевые слова: Дунай, озеро, гидротехнические сооружения, канал, шлюзы, общая минерализация, уровень воды.

Введение. Река Дунай является одной из крупнейших рек Европы. Количество и качество ее водных ресурсов в значительной мере определяет уровень



водообеспеченности региона. Дунай является трансграничной рекой и частично протекает по территории Украины, где расположен ее дельтовый участок площадью около 1200 км². Вершиной дельты считается створ Рени. Дельта Дуная включает Килийское и Тульчинское гирла и крупнейшие пресноводные озера Кагул, Картал, Ялпуг-Кугурлуй, Катлабух и Китай (рис.1) [1].

Рис. 1 - Придунайский регион Украины.

Целью данной статьи является уточнение пропускной способности пропускных каналов для улучшения экологического состояния придунайских озер.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

1. Определить экологическое состояние озер;
2. Разработать программу для расчета пропускной способности подводящих каналов;
3. Получить результаты расчета и сравнить их данными натурных наблюдений;
4. Расчет времени наполнения озер.

Материалы и методика исследования. В условиях естественного режима вода из Дуная в достаточном объеме попадала в озера через мелководную плавневую зону. Густые заросли тростника способствовали очищению воды от взвешенных наносов. В результате вода озер характеризовалась значительными колебаниями уровня и низкими показателями минерализации, которые в конце 50-х годов прошлого столетия не превышали 0,22 – 0,53 г/л. А содержание в воде биогенных элементов составляло: нитратов 0,029 – 0,068 мг/л, аммонийного азота 0,131 – 0,154 мг/л, фосфатов 0,020 – 0,035 мг/л.

Для обеспечения устойчивого использования их водных ресурсов для целей водоснабжения и орошения в 50-60-х годах озера были превращены в наливные водохранилища путем строительства ограждающих дамб и регулирующих

гидротехнических сооружений. В результате этого показатели минерализации увеличились до 0,7- 2,2 г/л [2].

С конца 60-х годов связь между озерами и Дунаем осуществлялась через шлюзы и самотечные каналы. В этом случае водообмен зависит от разницы отметки уровней воды в Дунае и озерах.

Прямое поступление взвешенных наносов через каналы привело к заилению баровой части озер.

Результаты исследования и их анализ. В настоящее время минерализация озер (табл.1) возрастает вниз по течению Дуная. Это частично объясняется тем, что в озера, расположенные выше по течению, поступает больше дунайской воды, и таким образом общая минерализация озер Кагул и Кугурлуй близка к минерализации дунайской воды (0,4 г/л). С другой стороны, в озере Китай минерализация выше дунайской в 5 раз и составляет около 2,5 г/л. Чем выше минерализация воды, тем большую долю от общей минерализации составляют нитраты и сульфаты, в то время как в менее соленых озерах минерализация близка к дунайской и основными ионами являются карбонаты и кальций/магний. Это происходит из-за притока высокоминерализованной воды из малых рек и подземных вод, где уровень натрия и сульфатов высок в результате ранее практиковавшегося внесения на сельскохозяйственные угодья гипса (CaCO_3) для уменьшения засоления орошаемых земель [2].

Таблица 1 - Основной ионный состав Придунайских озер

Озера	РН	Кальций, мг/л	Жесткость, мг-экв/л	Mg, мг/л	Na+K, мг/л	HCO_3^- , мг/л	Хлориды, мг/л	Сульфаты, мг/л	Общая минерализация, мг/л
Кагул	8.43	42,57	4.12	24.35	47.42	187.68	48.54	75.71	426.26
Кугурлуй	8.33	39.15	4.19	27.13	107.25	204.80	77,27	140.27	596.88
Ялпуг	8.33	36.62	6.92	62.40	242.18	239.70	208.22	374.57	1163.53
Южная часть Ялпуга	8.12	34.23	5.83	8.56	50.15	218.89	164.64	282.32	963.60
Северная часть Ялпуга	8.14	41.81	8.20	74.66	327.14	261.37	259.63	94.25	1454.04
Катлабух	8.57	82.01	13.85	118.70	344.28	253.07	319.41	694.25	1812.18
Китай	8.46	106.86	17.90	152.73	496.26	209,75	396.56	1110.57	2472.70

Общая минерализация, концентрация загрязняющих веществ и биогенов увеличивается в озерах с юга на север по мере удаления от Дуная и приближения к устьям малых рек, впадающих в озера.

В современных условиях наблюдается значительное уменьшение водообмена Дуная с озерами по сравнению с естественными условиями, особенно в маловодные годы. Понижение водообмена, видимо, объясняется не заилением транспортирующих каналов, а повышением лимитирующих отметок баров на выходных участках каналов в озера.

Для оценки времени наполнения водохранилища от отметки мертвого объема (УМО) до нормального подпорного уровня (НПУ), была разработана компьютерная программа, позволяющая расчетным путем определять расход воды в каналах.

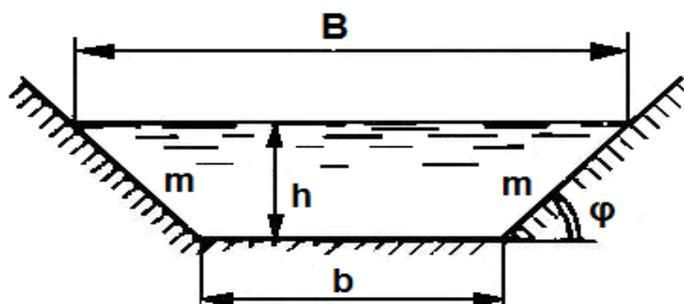
В программе выполнялся численный расчет течения воды в открытом русле. При этом были сделаны следующие допущения:

1) течение воды – установившееся, неравномерное. Это значит, что параметры потока при постоянном уровне воды в реке и озере изменяются по длине канала, но неизменны во времени. Учитывая неполную информацию о каналах (табл.2), соединяющих озера с рекой Дунай, поперечное сечение русла принималось трапецидальным (рис. 1) и неизменным по длине [3]. По длине канал принимался прямолинейным.

Таблица 2 – Характеристика соединительных каналов Придунайских озер

Название канала	Викета	Прорва	Скунда	105 км	Репида	Желявский	Кофа-Степовой		
Название озера	Кагул	Кугурлуй	Кугурлуй	Кугурлуй	Кугурлуй	Каглабух	Китай		
Расстояние истоков каналов от в/п Рени, км	11,5	30,5	41,3	61,5	69,5	97,5	110,5		
Горизонты озер, м абс	УМО	2,00	1,30	1,30	1,30	1,30	0,70	0,60	
	НПУ	3,50	2,80	2,80	2,80	2,80	1,70	1,50	
Длина канала, м	3300	1000	1880	1500	10100	3200	4775		
Отметки дна канала, м	возле	реки	1,25	0,60	0,75	1,70	-0,42	-0,10	-2,60
		озера	1,40	1,15	1,74	1,62	1,6	1,10	0,10
	проектная	-0,2	0,7	0	-0,3	-1	-0,7	0	-2,7
баровой части	2	1,5 – 1,8	0,8 – 1,2	0,6	0,6 – 1,0	1,4	1		
Пропускная способность гидротехнического сооружения, м ³ /с	75	50	63	63	60	70	30 20		

*в/п – водомерный пост



b – ширина канала по дну; h – глубина наполнения канала;
 m – коэффициенты откоса ($m = \text{ctg } \varphi$); B – ширина потока поверху.

Рис. 2 - Параметры поперечного сечения трапецидального русла.

Основные параметры поперечного сечения рассчитывались по формулам:

– ширина потока поверху

$$B = b + 2mh, \quad (1)$$

– площадь живого сечения потока

$$\omega = (b + mh)h, \quad (2)$$

– смоченный периметр

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}, \quad (3)$$

– гидравлический радиус

$$R = \omega / \chi. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение, которое описывает неравномерное установившееся движение в трапециидальном канале, имеет вид [3]

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}. \quad (5)$$

где h – текущая глубина канала, м; s – продольная координата, отсчитываемая вниз по течению вдоль канала, м; i – уклон дна канала; Q – расход воды, м³/с; C – коэффициент Шези, \sqrt{m}/c ; α – коэффициент Кориолиса.

Результаты предварительных расчетов показали, что решение уравнения (5), является неустойчивым: могут возникать ситуации, когда расчетная глубина стремится к нулю, а скорость – к бесконечности.

Для преодоления точки разрыва было принято решение: отсчитывать координату s вверх по потоку, от озера с более низким уровнем воды к более высокому на реке Дунай. Тогда изменяются знаки у величин s и i , и уравнение (5) приобретает вид

$$\frac{\partial h}{\partial s} = \frac{i + \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}. \quad (6)$$

На первом этапе задача формулировалась следующим образом. Пусть задан расход воды Q и профиль продольного сечения канала. Задан также уровень воды в нижнем створе (озере) h_0 . Требуется рассчитать форму свободной поверхности потока и определить уровень воды в верхнем створе (река Дунай). Это – задача с начальным условием или задача Коши.

Уравнение (6) в общем случае не имеет аналитического решения, поэтому его расчет производится численным методом. При этом использовался достаточно надежный метод Рунге-Кутты-Фельберга четвертого-пятого порядка точности с автоматическим выбором шага [4].

Данная программа позволяет построить кривые связи расхода воды через гидротехническое сооружение с уровнем воды в реке Дунай и в озере. Используя полученные кривые, можно установить при каком уровне в Дунае озеро может наполниться до своей максимальной отметки.

Известно, что наполнение озер через соединяющие их каналы, зависит от уровней воды в Дунае. Зная максимальные уровни воды Дуная у Рени, на водомерных постах Измаил, Кислица, Килия, Исакча (Румыния) и расстояния от них до места расположения начала канала [5], путем интерполяции можно рассчитать

максимальный уровень воды в Дунае разной обеспеченности на входе в каждый из каналов (рис.3).

Используя уровни воды в Дунае разной обеспеченности на входе в канал и горизонты воды в озере, можно, применив данную программу получить кривые зависимости расходов от уровней воды в канале.

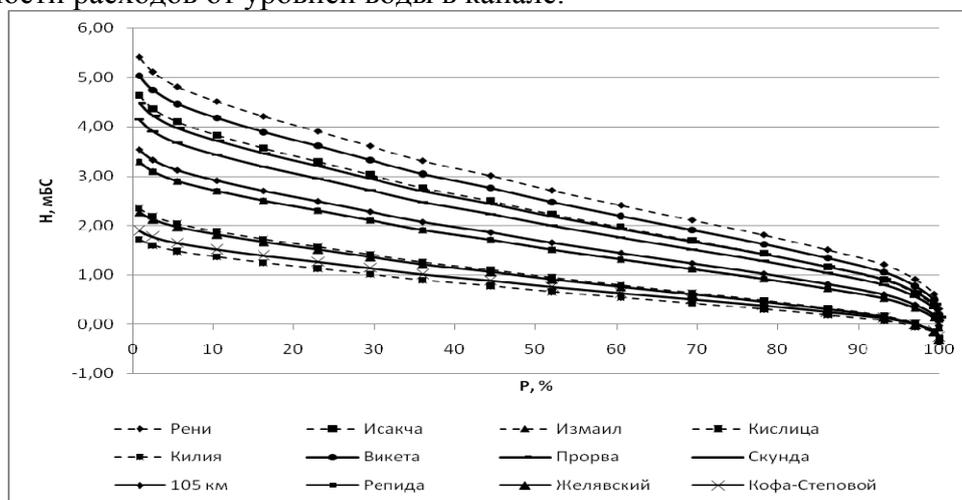
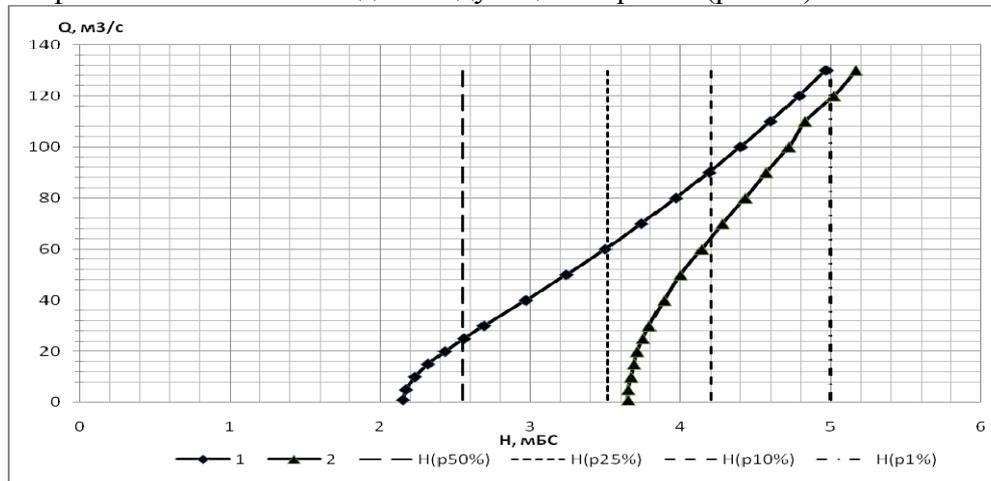


Рис. 3 - Кривые обеспеченности максимальных уровней воды в р. Дунай на водпостах и на входе в каналы в местах водозабора.

Результаты расчета, в виде кривых зависимости уровней в Дунае и расходов воды в канале Викета, соединяющего реку Дунай и озеро Кагул, при неизменных уровнях озера УМО и НПУ выглядят следующим образом (рис. 4.):



Пропускная способность гидротехнического сооружения от уровня воды в реке Дунай по расчету при отметках в озере Кагул УМО (1) и НПУ (2); $H_p=50; 25; 10; 1\%$ – уровни Дуная разной обеспеченности.

Рис. 4 – Кривые зависимости уровней воды в р. Дунай (H) и расходов воды (Q) в канале.

При уровне воды в Дунае 50%-й обеспеченности озеро Кагул не может наполниться до нормального подпорного уровня, а при 25%-й – наполнение озера будет близким к НПУ. При 10 % обеспеченности уровня наполнение озера до НПУ происходит при расходе в канале 90 м³/с. При 1%-й обеспеченности уровня Дуная расход воды в канале будет очень высоким (130 м³/с), что может привести к разрушению гидротехнических сооружений. Расчет показывает, что при начальном расходе 61 м³/с и 25% обеспеченности уровня в Дунае наполнение озера до уровня

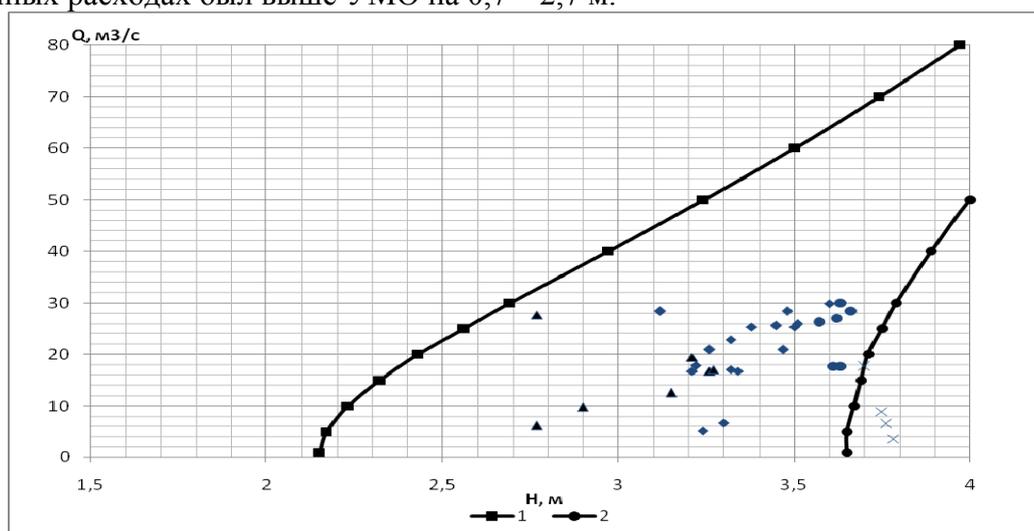
3,35м произойдет в течение 15 суток, а при 50%-й обеспеченности и начальном расходе 33 м³/с за 12 суток озеро наполнится только на четверть (табл.3). Необходимо отметить, что озеро Кагул соединяется с рекой Дунай двумя каналами: Викета и Орловский. В данной работе рассмотрен случай, когда наполнение озера происходит только через один канал – Викета.

Для определения времени наполнения озера от уровня мертвого объема до нормального подпорного уровня разность между отметками уровней была условно разделена на 10 равных частей с одинаковыми объемами. Зная, какой объем воды занимает каждая часть и, определив расход воды в канале, путем интерполяции можно получить время, за которое наполнится озеро.

Таблица 3 – Расходы воды в канале (м³/с – числитель) и время наполнения озера (сут. – знаменатель)

Уровень воды в Дунае, абс. м	Обеспеченность, %	Уровень воды в озере, м				
		2,00	2,30	2,75	3,20	3,50
2,55	50	$\frac{24,5}{6,8}$	$\frac{13,5}{12,4}$	-	-	-
3,52	25	$\frac{61}{3,7}$	$\frac{58}{2,9}$	$\frac{49,5}{3,4}$	$\frac{29}{5,7}$	-
3,73	20	$\frac{70}{2,4}$	$\frac{67}{2,5}$	$\frac{60}{2,8}$	$\frac{45}{3,7}$	$\frac{22,5}{7,4}$
4,16	10	$\frac{88,7}{1,9}$	$\frac{87}{1,9}$	$\frac{82}{2}$	$\frac{72,5}{2,3}$	$\frac{61,5}{2,7}$

Натурные наблюдения, проведенные на канале за период с 1995 по 2001 год сотрудниками одесского областного производственного управления по водному хозяйству, показали, что расход воды в канале не превышает 30 м³/с (рис.5). Эта величина значительно меньше его проектной пропускной способности (табл.2). Проектный расход не мог быть достигнут, так как уровень воды в озере при всех измеренных расходах был выше УМО на 0,7 – 2,7 м.



Пропускная способность гидротехнического сооружения от уровня воды в реке Дунай по расчету (при отметках в озере Кагул УМО (1) и НПУ (2) и по натурным наблюдениям при отметках в озере ▲ – 2,50-2,99 м; ◆ - 3,00-3,49 м; ○ - 3,50-3,70 м; × - > 3,70 м.

Рис. 5 – Сопоставление расчетных и натуральных наблюдений.

Выводы. Придунайские озера в условиях естественного режима характеризовались значительными колебаниями уровня, что обеспечивало высокое качество воды в озерах, но затрудняло использование водных ресурсов для целей водоснабжения и орошения. В 50-60-х годах прошлого столетия озера были превращены в наливные водохранилища путем строительства вдоль русла р. Дунай ограждающих дамб и регулирующих гидротехнических сооружений. Это привело к уменьшению водообмена воды в озерах и, как следствие, к увеличению показателей минерализации с 0,22 – 0,53 г/л до 0,70 – 2,40 г/л.

С использованием специально разработанной компьютерной программы были определены расходы воды в канале. Сопоставление результатов расчета с данными натурных наблюдений показало, что расход воды в канале колеблется в пределах от 2 м³/с до 30 м³/с. Это значительно меньше от его проектной пропускной способности (75 м³/с). Наполнение водохранилища происходит при максимальном уровне Дуная равному 4 м, который бывает в среднем 1 раз в 4 – 6 лет, и может быть достигнуто лишь при УМО в озере и уровне в Дунае 20% обеспеченности.

Таким образом, для улучшения экологического состояния придунайских озер необходима реконструкция существующих гидротехнических сооружений. При фиксированных уровнях воды в реке Дунай и в озере рост пропускной способности сооружений возможен за счет увеличения его ширины.

Список литературы

1. Решетников Н.М., Кичук И.Д. Основные положения по программе изучения водного менеджмента озер нижнего Дуная (Кагул, Картал, Кугурлуй). – Одесса. – 2000. – 38 с.
2. Материалы проекта ТАСИС «Предупреждение чрезвычайных ситуаций и защита от паводков в еврорегионе «Нижний Дунай», 2002.
3. Чугаев Р.Р. / Гидравлика: Учебник для вузов. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние. 1982. – 672 с., ил.
4. Дж. Форсайт, м. Малькольм, К. Моулер. Машинные методы математических вычислений. – изд. Мир, Москва, 1980. – 280 с.
5. Гидрология дельты Дуная. / Под ред. В.Н. Михайлова. – Изд-во «Геос». – М. 2004. – 448 с.

Екологічні проблеми дунайських озер пов'язані з обмеженою пропускною спроможністю підведених каналів. Соколов Ю.М., Стрюк Т.Ю., Сурков С.В..

В даній роботі розглянуті причини екологічних проблем придунайських озер, що виникли після спорудження каналів, з'єднуючих їх з річкою Дунай.

Ключові слова: Дунай, озеро, гідротехнічні споруди, канал, шлюзи, загальна мінералізація, рівень води.

Environmental problems of the Danube lakes in connection with reduced capacity supply channels. Sokolov Y., Struk T., Sourkov S.

In this paper we consider the causes of environmental problems of the Danube lakes that have arisen after the construction of canals connecting them to the river Danube.

Keywords: Danube, lake, hydrotechnical buildings, channel, sluices, general mineralization, water level.