

УДК 626.823.5

Р.В. Синица, К.И. Анисимов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ  
НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ЩИТОВЫХ ЗАТВОРОВ  
НА ВОДОПРОПУСКНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ**

*В работе рассмотрены вопросы контроля параметров пропускной способности шлюза-регулятора. В связи с тем, что данная величина является переменной, которая зависит от двух переменных параметров: высоты открытия щитового затвора и уровня воды за сооружением. В статье опубликованы результаты решения поставленной задачи и представлены кривые пропускной способности.*

**Ключевые слова:** пропускная способность, гидравлический прыжок.

*В роботі розглянуті питання контролю параметрів пропускної здатності шлюзу-регулятора. У зв'язку з тим, що дана величина є змінною, яка залежить від двох змінних параметрів: висоти відкриття щитового затвора і рівня води за спорудою. У статті опубліковані результати вирішення поставленого завдання і представлені криві пропускної здатності.*

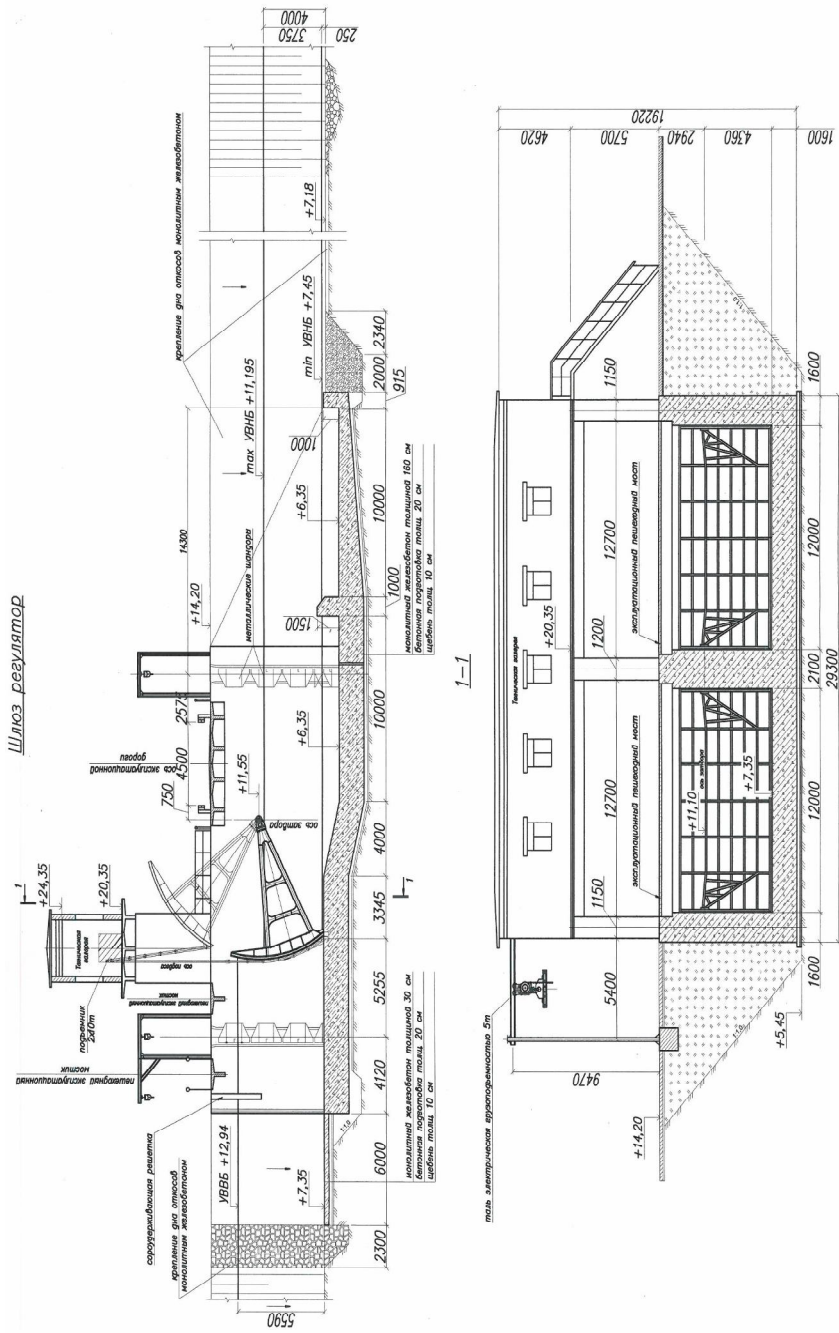
**Ключові слова:** пропускна здатність, гідралічний стрибок.

*The paper discusses the issues of control parameters bandwidth gateway controller. Due to the fact that the value is a variable that depends on two variables: the height of the opening of the shutter and the shield of the water level structure. The paper published the results of solving the problem, and the curves of bandwidth.*

**Keywords:** passing ability, hydraulic jump.

При проектировании водопропускных гидротехнических сооружений, важным вопросом является установление параметров пропускной способности сооружения при различных уровнях открытия щита, а также при изменяемых уровнях воды за затвором. Целью данной статьи являлось установление зависимостей влияния перечисленных параметров на пропускную способность гидротехнического сооружения.

В качестве примера было рассмотрено сооружение, шлюз-регулятор, расположенный на Северо-Крымском канале, представленное на рис. 1. Водопропускное сооружение состоит из двух щитовых затворов имеющих ширину  $b = 12,0$  м, и отверстие около дна русла с изменяемой высотой открытия, через которое происходит истечение потока.



Расчетный напор в верхнем бьефе перед щитом составлял  $H = 5,59$  м, а за щитом уровень воды являлся изменяемым в пределах от 0,25 м до 4,00 м.

При несвободном истечении потока, расход воды через щитовой затвор зависит от перепада уровней воды перед затвором и за ним непосредственно в сжатом сечении, значение которого определяется в соответствии с формулой

$$Q = \mu \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2g(H_0 - h_Z)}. \quad (1)$$

В формулу входят такие параметры как, коэффициент расхода –  $\mu$ , значение которого было определено в соответствии с формулой

$$\mu = \varepsilon \cdot \varphi, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент, зависящий от отметки уровня воды в верхнем бьефе и высоты открытия щитового затвора, определяемый по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \sqrt{0.4 \cdot \sin^3 Q \cdot \left(1 + \frac{a}{H}\right)^2}}, \quad (3)$$

где  $Q$  – угол между касательной к щиту затвора, при различных отметках открытия и горизонталью, значения углов приведены в таблице 1. Параметр величины открытия щитового затвора принимался переменным в пределах от 0,25 м до 4,0 м.

$\varphi$  – коэффициент скорости, определяемый в соответствии формулой

$$\varphi = \frac{a}{2 \cdot h_H}, \quad (4)$$

где  $h_H$  – уровень воды в нижнем бьефе, значение которого рассматривается переменным;

$H_0$  – уровень воды в верхнем бьефе с учетом скорости подхода потока;

$h_Z$  – глубина над сжатым сечением. Расчетом в связи с переменным уровнем воды в нижнем бьефе сооружения значение, которого принимается равным  $h_Z = h_H$ .

Как и при истечении жидкости через отверстия, за счет инерционных сил поток при выходе из-под щита уменьшает свое сечение, т.е. происходит сжатие его до величины сжатой глубины  $h_c$ .

Глубина потока воды в сжатом сечении, определяется в соответствии с формулой [5], которая будет располагаться на расстоянии, определяемом в соответствии с формулой

$$h_c = a \cdot \varepsilon \quad (5)$$

$$l = 0,75 \cdot a. \quad (6)$$

Таблиця 1

*Параметры высоты открытия щитового затвора*

Номер	Высота открытия щита, м	Угол наклона, град
1	0,25	60
2	0,50	62
3	0,75	64
4	1,00	66
5	1,25	69
6	1,50	71
7	1,75	73
8	2,00	75
9	2,25	77
10	2,50	79
11	2,75	81
12	3,00	83
13	3,25	85
14	3,50	87
15	3,75	89
16	4,00	90

Критическая глубина в водосбросном канале прямоугольного сечения, определяется по формуле

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \cdot g}}. \quad (7)$$

В соответствии с уравнением гидравлического прыжка, зная величину первой сопряженной глубины,  $h_c$  была определена величина значения второй сопряженной глубины, в соответствии с формулой

$$h_c'' = \frac{h_c}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_{кр}}{h_c} \right)^3} - 1 \right]. \quad (8)$$

Значение высоты водобойной стенки, устанавливалось в соответствии с формулой

$$a_c = \sigma \cdot h_c'' - H_c, \quad (9)$$

где  $H_c$  – статический напор на водобойной стенке, определяемый в соответствии с формулой;

$V_{co}$  – средняя скорость перед водобойной стенкой, определяемая в соответствии с формулой

$$H_c = H_{co} - \frac{\alpha \cdot V_{co}^2}{2g} \quad (10)$$

$$V_{co} = \frac{Q}{\sigma \cdot b \cdot h_c^n} \quad (11)$$

$$H_{co} = \left( \frac{Q}{m \cdot b \cdot \sqrt{2g}} \right)^{2/3}. \quad (12)$$

Глубина потока непосредственно за щитовым затвором меньше глубины потока в нижнем бьефе  $h_z$  определяется в соответствии с формулой

$$h_z = \sqrt{h_n^2 - \frac{2 \cdot Q^2}{g \cdot b^2} \cdot \frac{(h_n - h_c)}{h_n \cdot h_c}}. \quad (13)$$

Водобойную стенку необходимо располагать на расстоянии, определяемом в соответствии с формулой

$$l = 0,75 \cdot l_{II}, \quad (14)$$

где  $l_{II}$  – длина гидравлического прыжка, определяемая в соответствии с формулой

$$l_{II} = 2,5 \cdot (1,9h_c^n - h_c). \quad (15)$$

По окончанию проведения расчетов по определению высоты водобойной стенки была определена форма сопряжения, которая будет иметь место непосредственно за стенкой.

В случае наличия двух водосливных отверстий коэффициент бокового сжатия необходимо вычислить по формуле

$$\varepsilon' = 1 - 0,2 \cdot \left[ \frac{\xi_y + (n-1)\xi_{\sigma}}{n} \right] \cdot \frac{H_0}{b}, \quad (16)$$

где  $b$  – ширина отверстия;

$n$  – число отдельных водосливных отверстий;

$\xi_{\sigma}$  – коэффициент уменьшения, учитывающий форму быков в плане, принимаемый равным – 0,45;

$\xi_y$  – коэффициент скругления ребер устоев, значение которого равно – 0,70.

Суммарный расход щитового затвора при одновременной работе двух затворов определялся в соответствии с формулой

$$Q_{\text{сум}} = 2 \cdot Q \cdot \varepsilon'. \quad (17)$$

С целью гашения кинетической энергии потока воды в нижнем бьефе, было предусмотрено устройство водобойной стенки. Расчет водобойной стенки заключается в нахождении ее высоты  $a_c$  и расстояния от сооружения до водобойной стенки  $l$ .

В результате установки водобойной стенки увеличивается глубина подтопления с нижнего бьефа щитового затвора, а при переливе воды через стенку возникает напор над стенкой  $H_c$ .

Глубина перед стенкой должна удовлетворять условию: форма сопряжения бьефов должна быть в виде затопленного прыжка

$$a_c + H_c \geq h_c'''. \quad (18)$$

Высота водобойной стенки, определялась в соответствии с формулой

$$a_c = \sigma \cdot h_c'' - H_c. \quad (19)$$

Полагая, что водобойная стенка незатопленная, напор  $H_c$  определяется в соответствии с формулой расхода для водослива. Полный напор на водосливной стенке был определен в соответствии с формулой

$$H_{co} = \left( \frac{Q}{m \cdot b \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (20)$$

где  $m$  – коэффициент расхода водосливной стенки;

$b$  – ширина водосливной стенки.

Статический напор над водосливной стенкой определялся в соответствии с формулой

$$H_c = H_{co} - \frac{\alpha \cdot V^2}{2g}, \quad (21)$$

где  $V$  – средняя скорость подхода потока к водосливной стенке, определяемая в соответствии с формулой

$$V = \frac{Q}{\sigma \cdot b \cdot h_c''}. \quad (22)$$

В дальнейшем в результате проведенных расчетов было установлено расстояние расположения водобойной стенки и высота ее.

За водобойной стенкой высотой  $a_c = 1,5$  м, будет образовываться второй гидравлический прыжок, который также необходимо затопить. В соответствии с представленными расчетами, были определены параметры второго гидравлического прыжка, происходящего за водобойной стенкой.

Полный напор, который будет формироваться, над водобойной стенкой определялся в соответствии с формулой

$$T_0 = T + \frac{V_0^2}{2g} \quad (23)$$

$$T = C_H + H, \quad (24)$$

где  $C_H$  – высота водобойной стенки.

В дальнейшем расчеты по определению расположения и высоты водобойного колодца производились в такой же последовательности, как и первой. Высота водобойной стенки составляет  $a_k = 1,0$  м.

Таблица 2

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 4,0(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	64,30	113,79
2	3,5	84,24	149,10
3	3,0	109,41	193,65
4	2,5	143,40	253,82
5	2,0	недопустимо	

Таблица 3

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 3,75(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	57,29	101,40
2	3,5	75,07	132,87
3	3,0	97,49	172,56
4	2,5	127,78	226,18
5	2,0	недопустимо	

Таблиця 4

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 3,5(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	50,65	89,65
2	3,5	66,36	117,46
3	3,0	86,19	152,56
4	2,5	112,97	199,96
5	2,0	недопустимо	

Таблиця 5

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 3,25(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	44,37	78,53
2	3,5	58,14	102,90
3	3,0	75,50	133,64
4	2,5	98,97	175,17
5	2,0	недопустимо	

Таблиця 6

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 3,0(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	38,45	68,06
2	3,5	50,38	89,17
3	3,0	65,43	115,81
4	2,5	85,76	151,80
5	2,0	115,55	204,53
6	1,5	недопустимо	



Таблиця 7

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 2,75(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	недопустимо	
2	3,5	43,10	76,28
3	3,0	55,97	99,07
4	2,5	73,37	129,86
5	2,0	98,85	174,96
6	1,5	недопустимо	

Таблиця 8

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 2,5(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	недопустимо	
2	3,5	36,30	64,25
3	3,0	47,14	83,44
4	2,5	61,79	109,37
5	2,0	83,25	147,35
6	1,5	недопустимо	

Таблиця 9

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 2,25(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	недопустимо	
2	3,5	29,99	53,08
3	3,0	38,95	68,94
4	2,5	51,05	90,36
5	2,0	68,78	121,74
6	1,5	недопустимо	

Таблиця 10

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 2,0(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	недопустимо	
2	3,5	24,19	42,82
3	3,0	31,42	55,61
4	2,5	41,18	72,89
5	2,0	55,48	98,20
6	1,5	78,96	139,76
7	1,0	недопустимо	

Таблиця 11

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 1,75(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	недопустимо	
2	3,5	18,92	33,49
3	3,0	24,58	43,50
4	2,5	32,21	57,02
5	2,0	43,40	76,82
6	1,5	61,77	109,33
7	1,0	недопустимо	

Таблиця 12

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 1,5(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	4,0	недопустимо	
2	3,5	14,22	25,16
3	3,0	18,46	32,68
4	2,5	24,20	42,83
5	2,0	32,60	57,71
6	1,5	46,40	82,13
7	1,0	недопустимо	

Таблиця 13

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 1,25(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	3,5	недопустимо	
2	3,0	13,12	23,22
3	2,5	17,20	30,44
4	2,0	23,17	41,01
5	1,5	32,97	58,36
6	1,0	52,39	92,73
7	0,5	недопустимо	

Таблиця 14

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 1,0(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	3,5	недопустимо	
2	3,0	8,64	15,28
3	2,5	11,32	20,03
4	2,0	15,25	26,99
5	1,5	21,70	38,41
6	1,0	34,49	61,04
7	0,5	недопустимо	

Таблиця 15

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 0,75(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	3,5	недопустимо	
2	3,0	4,98	8,81
3	2,5	6,52	11,55
4	2,0	8,79	15,56
5	1,5	12,51	22,14
6	1,0	19,88	35,18
7	0,5	недопустимо	

Таблиця 16

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 0,5(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	3,5	недопустимо	
2	3,0	2,27	4,01
3	2,5	2,97	5,26
4	2,0	4,00	7,09
5	1,5	5,70	10,09
6	1,0	9,06	16,03
7	0,5	19,08	33,76

Таблиця 17

*Параметры пропускной способности*

Величина открытия затвора $a = 0,25(м)$			
номер	уровень в Н.Б. (м)	расход воды $Q(м^3 / с)$	
		1 затвор	2 затвора
1	3,0	недопустимо	
2	2,5	0,76	1,39
3	2,0	1,03	1,82
4	1,5	1,46	2,59
5	1,0	2,32	4,11
6	0,5	4,89	8,66
7	0,25	недопустимо	

В связи с тем, что параметр пропускной способности щитового затвора, работающим в затопленном режиме, является переменным и зависящим от двух взаимно несвязных параметров, важным вопросом является контроль, за значениями пропускных расходов. В соответствии с проведенными расчетами были определены значения пропускных расходов щитового затвора, при работе одного щита и двух одновременно, построены графики зависимости пропускных способностей щитового затвора (см. рис. 2), при работе одного и двух затворов при различных высотах открытия и различных уровнях воды в нижнем бьефе.

График пропускной способности при работе одного щитового затвора

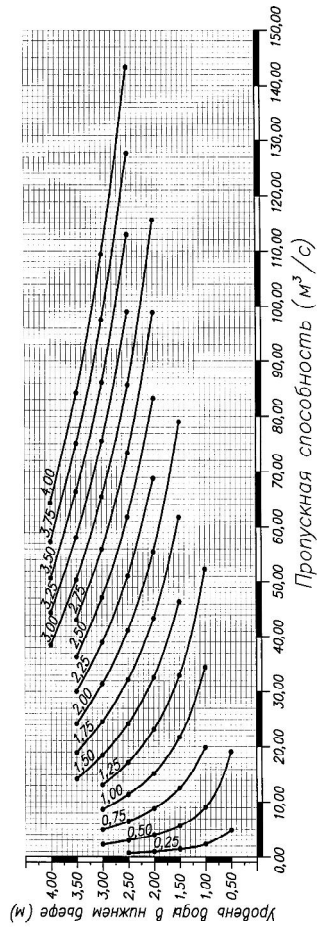


График пропускной способности при работе двух щитовых затворов

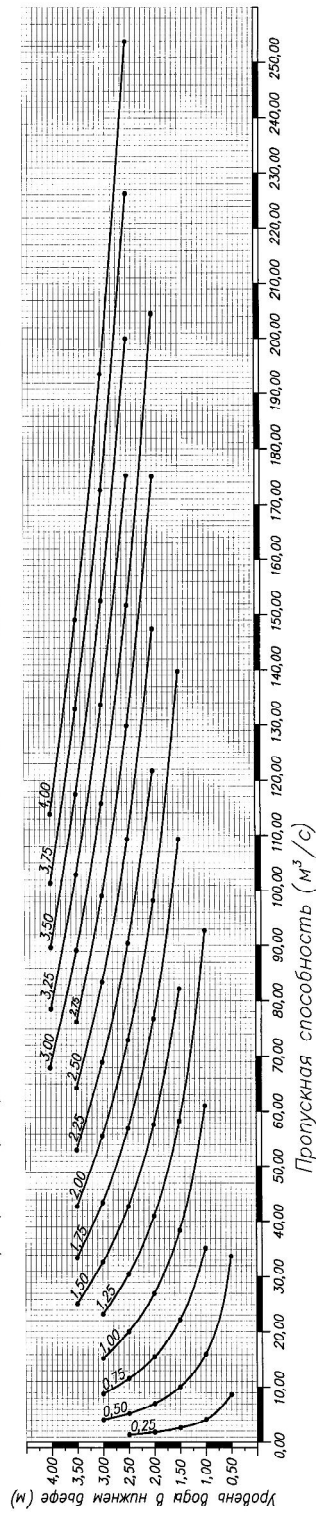


Рис. 2

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н., Нетюхайло А.П., Шеренков И.А., Даденков В.Ю., Клецевникова Т.П., Железняк И.А. Справочник по гидравлике. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа, 1984. – С. 119-157.*
2. *Ухин Б.В., Гусев А.А. Гидравлика: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2012. – С. 290-334.*
3. *Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – С. 47-60.*
4. *Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – С. 344-389.*
5. *Чертоусов М.Д. Гидравлика. Специальный курс. – М.: Госэнергоиздат, 1962.*
6. *Ботук Б.О. Гидравлика. – М.: Высш. шк., 1962.*

*Стаття надійшла до редакції*

#### **Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Водовідведення і гідравліка» Одеської державної академії будівництва та архітектури **В.П. Хоружий**

директор проектно-вишукувального інституту  
«Укрпівддіпроводгосп» **О.А. Чижик**